

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM SISTEMA DE  
AQUECIMENTO SOLAR UTILIZANDO COLETOR COM  
SUPERFÍCIE ABSORVEDORA EM CHAPAS DE FORRO DE PVC**

Dissertação apresentada à

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE**

Como parte dos requisitos a obtenção do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Edmilson Pedreira dos Reis**

**Orientador: Profº Drº Luis Guilherme Meira de Souza**

Salvador, Agosto de 2009

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM SISTEMA DE  
AQUECIMENTO SOLAR UTILIZANDO COLETOR COM  
SUPERFÍCIE ABSORVEDORA EM CHAPAS DE FORRO DE PVC**

**Edmilson Pedreira dos Reis**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

sendo aprovada em sua forma final.

---

Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza – UFRN – Orientador

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Luiz Guilherme Meira de Souza – UFRN

---

Prof. Dr. José Ubiragi de Lima Mendes – UFRN

---

Prof. Dr. Roberto Silva de Souza – IFRN

"A maior parte das coisas importantes  
no mundo foram realizadas por pessoas  
que continuaram tentando quando parecia  
não haver esperança de modo algum."

(Dale Carnegie)

**Dedico este trabalho aos meus queridos pais, irmãos, a minha amada esposa Letícia Reis, a minha filha Beatriz de Jesus Reis, razão da minha vida e a meu tio Isaías Pedreira que, também, contribuiu para concretização deste sonho.**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre ter me guiado, dado forças e sabedoria para chegar neste momento tão sonhado e ter colocado em meu caminho pessoas maravilhosas.

Aos Meus Pais, Bráulio dos Reis e Maria das Virgens P. dos Reis, pelo apoio e incentivo de forma incondicional em todas as etapas da minha vida acadêmica e sempre foram sábios e insistentes, em ensinar aos seus filhos o caminho do bem sem medir esforços para dar instrução aos mesmos.

Ao meu orientador Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup> Luis Guilherme Meira de Souza pela confiança, ensinamento, amizade e que, sem dúvida, me mostrou que ensinar é muito mais que transmitir conhecimento, é ter respeito pelos alunos, é respeitar as diferenças de cada um e sempre com sua simplicidade, humildade e competência tornando-o um verdadeiro EDUCADOR.

Aos Professores Dr<sup>o</sup> José Ubiragi de Lima Mendes e Dr<sup>o</sup> Roberto Silva de Souza pelos comentários, críticas e sugestões que ajudaram a melhorar este trabalho.

Ao Doutorando Reginaldo Dias e Aldo P. M. Júnior, técnico do Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar da UFRN, que sempre me ajudaram no que precisei.

Aos novos amigos Ribeiro, Wilson (Mosquito) e Rafaela.

A Msc. Débora Damasceno Belarmino pelas sugestões para melhoria deste trabalho.

Aos funcionários terceirizados do *Campus* de Eunápolis: Gel, Nélio, Dona Nice.

Ao amigo Prof<sup>o</sup> Msc. Guillermo van Erven Cabala, que sempre se prontificou a ajudar, assumindo, meus horários de aulas permitindo assim minha liberação do IFBA.

Ao amigo Prof<sup>o</sup> Eduardo Jorge V. Dultra e demais professores do IFBA - *Campus* de Eunápolis pelas palavras de estímulo e apoio.

A todos os companheiros e colegas deste mestrado pela ajuda e apoio.

Ao PPgEM/UFRN e CTPGP/IFBA nas pessoas de Rubens Marimbondo do Nascimento e Núbia Moura Nogueira por desempenharem suas funções de forma competente.

Ao DEPEN/IFBA, tendo como chefe a Prof<sup>a</sup> Daniela Pereira Contelli, pela liberação para realização do estágio na UFRN.

A CAPES, UFRN e IFBA pela oportunidade desta capacitação.

A todos os professores que ministraram aulas nesta pós-graduação pelos ensinamentos e profissionalismo.

Ao casal Adenilson R. dos Santos e Rosângela M. H. dos Santos pela acolhida de maneira calorosa, dada minha esposa e filha durante meu período de estágio na UFRN.

Um muitíssimo obrigado a minha amada esposa Letícia de Jesus Reis pelo amor, compreensão, companheirismo, e principalmente, paciência nos momentos difíceis deste mestrado.

A todos que direta ou indireta contribuíram para conclusão deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos!

## RESUMO

*Apresenta-se um coletor solar alternativo a ser utilizado em um sistema para aquecimento de água destinada ao banho, cuja principal característica é seu baixo custo. O coletor consiste de cinco placas de forro de PVC de 10 mm de espessura, 200 mm de largura e 1400 mm de comprimento com área correspondente a 1,40 m<sup>2</sup>. As placas foram ligadas pelas extremidades em paralelo a tubos de PVC de Ø40 mm e de Ø32 mm. As placas, de um lado, foram revestidas com chapas de alumínio provenientes de latinha de refrigerantes e cervejas abertas. O sistema funcionou em regime de termo-sifão e foi testado para duas configurações: as placas sem revestimento e revestidas com o material alumínio, para a determinação da influência desse material na eficiência do coletor. Para as configurações estudadas utilizaram-se placas de isopor de 20 mm na superfície inferior para minimizar as perdas térmicas pela parte de baixo. O reservatório térmico do sistema de aquecimento é, também, alternativo e de baixo custo, pois foi construído a partir de um reservatório de polietileno para armazenamento de água, com volume de 150 e 200 litros. Serão apresentados dados de eficiência térmica, perda térmica, temperatura da água do reservatório térmico no final do processo e de simulação de banhos para uma residência com quatro moradores. Serão demonstradas as viabilidades térmica, econômica e de materiais do coletor proposto, cuja principal inovação consiste na utilização de materiais recicláveis, latas de cervejas e refrigerantes para o aumento da temperatura da placa absorvedora.*

**Palavras chaves:** *coletor solar alternativo, aquecimento solar de água, energia solar, reciclagem, baixo custo, tubos de PVC.*



## ABSTRACT

It's presented a solar collector to be used in a system for heating bath water, whose main characteristic is its low cost. The collector consists of five plates of PVC with 10 mm thick, 200 mm in width and 1400mm in length, with an area equal to 1.4 square meters. The plates were connected in parallel to the ends of PVC tubes of  $\varnothing$  40 mm and  $\varnothing$ 32 mm. The plates were coated on one side with aluminum sheets of soft drinks and beers cans open. The system worked on a thermosiphon and was tested in two configurations: the plates uncoated and coated with aluminum material, to determine the influence of material on the efficiency of the collector. For both configurations was used EPS plates below the surface to minimize heat losses from the botton. The thermal reservoir of the heating system is, also, alternative and low cost, since it was constructed from a polyethylene tank for storing water, with volume of 150 end 200 liters. It will be presented the thermal efficiency, heat loss, water temperature of the thermal reservoir at the end of the process and simulation of baths for a house with four residents. The will be demonstrated thermal, economic and material viability of the proposed collector, whose main innovation is the use of recyclables materials, cans of beer and soft drinks, to increase the temperature of the absorber plate.

**Keywords:** alternative solar collector, heating solar water, solar energy, recycling, low cost, PVC tubes.

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.1	Apresentação do trabalho.....	17
1.2	Objetivos .....	21
1.2.1	Objetivo geral.....	21
1.2.2	Objetivos específicos.....	21
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	22
2.1	A importância da energia solar.....	22
2.2	Características da energia solar .....	22
2.3	O coletor solar para aquecimento de líquidos.....	23
2.3.1	Os coletores alternativos no mundo .....	25
2.4	O cloreto de polivinila (PVC) .....	29
2.4.1	Generalidades.....	29
2.4.2	A obtenção do PVC.....	30
2.4.3	Principais características do PVC.....	31
2.5	A degradação do PVC .....	32
2.6	A resina poliéster.....	33
2.7	O EPS (isopor) .....	34
A)	Algumas propriedades do EPS.....	34
a.1.	A absorção de água.....	34
a.2	Propriedades térmicas do EPS .....	35
a.3	Propriedades mecânicas do EPS .....	35
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	36
3.1	Processos de construção, montagem e de ensaio do sistema de aquecimento proposto .....	36
3.2	Desenvolvimento teórico .....	49
3.2.1	Coefficiente global de perdas .....	49
3.2.2	Método da temperatura média da placa .....	49
3.2.3	Método da perda térmica .....	50
3.2.4	Método das trocas térmicas.....	50
3.3	Perda pela cobertura .....	50

3.4	Perdas pelas laterais e base do coletor.....	54
3.5	Determinação do rendimento térmico .....	54
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>55</b>
4.1	Resultados de parâmetros térmicos para determinação da eficiência térmica do coletor estudado .....	55
4.1.1	Configuração I - Coletor sem revestimento + RT150 .....	55
4.1.2	Configuração II - Coletor com revestimento + RT150.....	59
4.1.3	Configuração III - Coletor sem revestimento + RT200.....	64
4.2	Determinação da perda térmica para cada configuração .....	75
4.3	Perda térmica do reservatório alternativo .....	76
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>79</b>
5.1	Conclusões .....	79
5.2	Sugestões.....	80
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>81</b>

## LISTAS DE FIGURAS

FIGURA 2.1.	Radiação solar global e suas componentes.....	23
FIGURA 2.2.	Esquema básico de um sistema de aquecimento solar convencional .....	24
FIGURA 2.2a	Conversão da energia solar em calor .....	25
FIGURA 2.3.	Fluxograma de fabricação do PVC.....	30
FIGURA 2.4.	Reação de degradação do PVC.....	32
FIGURA 2.5.	Esquema da estrutura da Resina Isoftálica.....	33
FIGURA 3.1.	Modelo do sistema coletor alternativo proposto.....	36
FIGURA 3.2.	Abertura do rasgo nos tubos de distribuição de água .....	37
FIGURA 3.3.	Tubos de distribuição (Ø40 mm e Ø32 mm) com os rasgos concluídos.....	37
FIGURA 3.4.	Marcação das placas de PVC .....	38
FIGURA 3.5.	Corte das placas de PVC .....	38
FIGURA 3.6.	Colocação do tubo Ø32mm no interior do tubo de Ø40mm .....	38
FIGURA 3.7.	Tubo de Ø32mm no interior do tubo de Ø40mm .....	38
FIGURA 3.8a.	Encaixe do tubo de distribuição em uma das extremidades das placas. ....	39
FIGURA 3.8b.	Encaixe do tubo de distribuição em uma das extremidades das placas. ....	39
FIGURA 3.9a.	Encaixe da outra extremidade das placas nos tubos de distribuição.....	39
FIGURA 3.9b.	Encaixe da outra extremidade das placas nos tubos de distribuição.....	39
FIGURA 3.10.	Verificação das dimensões do coletor antes da aplicação da resina Isoftálica.....	40
FIGURA 3.11.	Utilização da resina Isoftálica para fixação da Placa ao tubo de distribuição .....	40
FIGURA 3.12.	Aplicação da Resina Isoftálica por entre os tubos de distribuição .....	41
FIGURA 3.13.	Saída de água quente do coletor .....	41
FIGURA 3.14.	Entrada de água quente do coletor.....	41
FIGURA 3.15.	Pintura de cor preta fosca na placa coletora.....	42
FIGURA 3.16.	Pintura de cor preta fosca na placa coletora.....	42
FIGURA 3.17.	Teste de vazamento.....	42
FIGURA 3.18.	Pintura final do coletor.....	43
FIGURA 3.19.	Sistema de aquecimento solar de água concluído.....	43
FIGURA 3.20.	Detalhe do termopar .....	43
FIGURA 3.21.	Reservatórios térmicos alternativos RT 200 e RT 150 utilizados .....	44

FIGURA 3.22. Sistema de aquecimento solar (CONFIGURAÇÃO I).....	47
FIGURA 3.23. Sistema de aquecimento solar (CONFIGURAÇÃO II).....	48
FIGURA 3.24. Sistema de aquecimento solar (CONFIGURAÇÃO III).....	48
FIGURA 3.25. Secção transversal do coletor em estudo.....	51
FIGURA 3.26. Circuito térmico do coletor solar em estudo .....	51
FIGURA 4.1. Temperaturas médias, em graus Celsius, em diversos pontos na superfície da placa absorvedora.....	58
FIGURA 4.2. Temperaturas médias, em graus Celsius, em diversos pontos na superfície da placa absorvedora.....	61
FIGURA 4.3. Temperaturas médias, em graus Celsius, em diversos pontos na superfície da placa absorvedora.....	66
FIGURA 4.4. Comportamento das temperaturas médias horárias de entrada e saída do coletor - CONFIGURAÇÃO I.....	68
FIGURA 4.5. Comportamento das temperaturas médias horárias de entrada e saída do coletor - CONFIGURAÇÃO II.....	68
FIGURA 4.6. Comportamento das temperaturas médias horárias de entrada e saída do coletor - CONFIGURAÇÃO III.....	69
FIGURA 4.7. Comparação da variação de temperatura média ( $\Delta T$ ) para as três configurações ensaiadas .....	69
FIGURA 4.8. Comparação da eficiência térmica ( $\eta_t$ ) para as três configurações .....	70
FIGURA 4.9. Comparação entre as temperaturas médias horárias no interior do reservatório térmico - Configuração I.....	70
FIGURA 4.10. Comparação entre as temperaturas médias horárias no interior do reservatório térmico - Configuração II.....	71
FIGURA 4.11. Comparação entre as temperaturas médias horárias no interior do reservatório térmico - Configuração III.....	71
FIGURA 4.12. Média dos níveis de temperatura no interior do reservatório às 8:00 h .....	72
FIGURA 4.13. Média dos níveis de temperatura no interior do reservatório às 11:30 h .....	72
FIGURA 4.14. Média dos níveis de temperatura no interior do reservatório às 15:00 h .....	72
FIGURA 4.15. Média dos níveis de temperatura no interior do reservatório às 8:00 h .....	73
FIGURA 4.16. Média dos níveis de temperatura no interior do reservatório às 11:30 h .....	73
FIGURA 4.17. Média dos níveis de temperatura no interior do reservatório às 15:00 h .....	73
FIGURA 4.18. Média dos níveis de temperatura no interior do reservatório às 8:00 h .....	74
FIGURA 4.19. Média dos níveis de temperatura no interior do reservatório às 11:30 h .....	74

FIGURA 4.20. Média dos níveis de temperatura no interior do reservatório às 15:00 h .....74

## LISTAS DE TABELAS

TABELA 2.1.	Principais propriedades do PVC.....	31
TABELA 2.2.	Principais tipos de resinas e suas características principais. ....	33
TABELA 2.3.	Principais propriedades do EPS.....	34
TABELA 2.4.	Propriedades mecânicas do EPS.....	35
TABELA 4.1.	Dados do primeiro dia de ensaio .....	55
TABELA 4.2.	Dados do segundo dia de ensaio .....	55
TABELA 4.3.	Dados do terceiro dia de ensaio .....	56
TABELA 4.4.	Dados do quarto dia de ensaio .....	56
TABELA 4.5.	Resultados médios gerais – <i>sem revestimento</i> + <i>RT150</i> .....	57
TABELA 4.6.	Níveis de temperatura média em vários pontos do reservatório térmico para cada dia de ensaio.....	58
TABELA 4.7.	Dados do primeiro dia de ensaio .....	59
TABELA 4.8.	Dados do segundo dia de ensaio .....	59
TABELA 4.9.	Dados do terceiro dia de ensaio .....	60
TABELA 4.10.	Dados do quarto dia de ensaio .....	60
TABELA 4.11.	Resultados médios gerais – <i>com revestimento</i> + <i>RT150</i> .....	61
TABELA 4.12.	Níveis de temperatura média em vários pontos do reservatório térmico para cada dia de ensaio.....	62
TABELA 4.13.	Dados da simulação de banhos ( <i>Configuração II</i> ) .....	63
TABELA 4.14.	Dados do primeiro dia de ensaio .....	64
TABELA 4.15.	Dados do segundo dia de ensaio .....	64
TABELA 4.16.	Dados do terceiro dia de ensaio .....	65
TABELA 4.17.	Dados do quarto dia de ensaio .....	65
TABELA 4.18.	Resultados médios gerais – <i>sem revestimento</i> + <i>RTA200</i> .....	66
TABELA 4.19.	Níveis de temperatura média em vários pontos do reservatório térmico para cada dia de ensaio.....	67
TABELA 4.20.	Resultados médios gerais para os dias de ensaio de cada configuração estudada.....	67
TABELA 4.21.	Resultados do teste realizado com o reservatório térmico alternativo proposto.....	76
TABELA 4.22.	Custo dos materiais utilizados na montagem do coletor.....	78

## SÍMBOLOS

Alfabeto Latino		UNIDADES
$\Delta T$	Gradiente de temperatura entre entrada e saída do fluido	[°C]
$\dot{m}$	Vazão mássica	[kg/s]
A	Área do coletor (área exposta à radiação solar)	[m <sup>2</sup> ]
$c_p$	Calor específico da água	[KJ/kg · K]
$e_f$	Espessura da placa de forro	[mm]
g	Constante da aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$h_{c(placa - amb)}$	Coefficiente de transmissão de calor por convecção entre a superfície externa da placa absorvedora e ao ar ambiente	[W/m <sup>2</sup> . K]
$h_{r(placa - amb)}$	Coefficiente de transmissão de calor por radiação entre a superfície externa da placa absorvedora e o ar ambiente.	[W/m <sup>2</sup> . K]
I	Radiação solar global	[KW/m <sup>2</sup> ]
$k_{ar}$	Condutibilidade térmica do ar	[W/m. K]
$k_{forro}$	Condutibilidade térmica da placa de forro	[W/m.K]
$N_u$	Número de Nusselt	
$P_{abs.}$	Potência absorvida pelo coletor	[W]
$P_p$	Potência perdida pelo coletor	[W]
$P_u$	Potência transferida ao fluido de trabalho	[W]
$R_a$	Número de Rayleigh	
$R_{c(placa - amb)}$	Resistência convectiva entre a superfície externa da placa absorvedora e o ar ambiente	[K/W]
$R_{r(placa - amb)}$	Resistência radiativa entre a superfície externa da placa absorvedora e o ar ambiente	[K/W]
$T_{amb}$	Temperatura ambiente	[°C]
$T_{mpi}$	Temperatura média da superfície externa inferior da placa	[°C]
$T_e$	Temperatura média da superfície superior da placa absorvedora	[°C]
$U_{topo}$	Coefficiente global de perda térmica pela cobertura	[W/m <sup>2</sup> . K]
$U_{baixo}$	Coefficiente global de térmica pelo fundo do coletor	[W/m <sup>2</sup> . K]
$U_{laterais}$	Coefficiente global de térmica pelas laterais do coletor	[W/m <sup>2</sup> . K]
$U_{perdas}$	Coefficiente global de perda térmica	[W/m <sup>2</sup> .K]



## Alfabeto grego

## UNIDADES

$\beta$	Coeficiente de dilatação térmica	[1/K]
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman	$5,67 \times 10^{-8}$ [W/m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> ]
$\rho$	Peso específico	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\nu$	Viscosidade cinemática	[m <sup>2</sup> /s]
$\delta$	Espessura da camada de fluido	[m]
$\eta_t$	Rendimento térmico do coletor e/ou sistema	[%]
$\epsilon_{placa}$	Emissividade da placa absorvedora	

## 1.0 INTRODUÇÃO

### 1.1. Apresentação do trabalho

Energias alternativas são tipos de energia com grandes potenciais, ecologicamente corretas, que podem garantir um desenvolvimento sustentável para o homem. Esse é um conceito que traduz a importância dessas fontes, renováveis, limpas, e que podem trazer como diferencial a socialização do bem; energia que não é exclusivo, apenas, dos detentores de riquezas materiais.

A qualificação de alternativas está associada ao exaurir-se das fontes convencionais poluidoras que estão comprometendo a própria sobrevivência humana no planeta Terra. Portanto, para a continuidade da vida, urge a substituição de fontes convencionais poluidoras para garantir, energeticamente, a sobrevivência do homem.

As tecnologias e fontes energéticas usadas, atualmente, influenciarão significativamente o amanhã. E sabe-se, claramente, que a maioria das tecnologias em uso não é ecologicamente apropriada e está provocando danos irreversíveis à natureza, e por não serem renováveis, estão se esgotando rapidamente.

Essas percepções tornam o direcionamento às alternativas renováveis de energia inevitável. Nesse contexto, as fontes solar, eólica e de biomassa abundantes, amplamente distribuídas e ecologicamente atrativas surgem como principais opções na substituição gradativa das energias sujas, principalmente, por não poluírem e não contribuírem para o aquecimento global.

A natureza está dando sinais de que não mais suporta a utilização intensa de fontes a base de petróleo e de seus derivados. O avanço das marés, a alteração do calendário das chuvas, a diminuição da espessura da camada de gelo nos pólos e aumento perceptível da temperatura ambiente em todas as partes do mundo, são marcas indeléveis que traduzem a reação do planeta à agressão massiva do ser humano a sua sustentabilidade.

Sem a presença do homem a natureza não seria modificada. Os animais não agredem a vida, mesmo nos atos agressivos, apenas, buscam a sobrevivência, a manutenção da espécie. Quem agride é dito humano, que, conscientemente, destrói para a obtenção de materialidade.

Nas duas últimas décadas, as energias alternativas estiveram no centro das discussões, especialmente, nos países mais desenvolvidos. Conscientes de que o planeta não suporta mais tanta agressão, busca-se encontrar formas alternativas de geração de energia, que não produzam males tão significativos como produzidos pelas fontes fósseis.

A participação das fontes renováveis nas matrizes energéticas de vários países teve aumento substancial. Várias nações desenvolvidas e até subdesenvolvidas, em menor escala, tem buscado nas energias renováveis formas de suprimento de energia e geração de tecnologia que representam uma fonte de geração de recursos substanciais, pois é indubitável que essas novas formas terão que ser utilizadas para garantir a preservação da vida na Terra.

Países como os Estados Unidos, Espanha, Inglaterra, Alemanha, Portugal, Austrália, China, Índia, estão investindo e desenvolvendo tecnologia para substituírem os combustíveis fósseis por energias limpas. Um grande exemplo desse investimento é a obtenção de uma célula fotovoltaica com eficiência de 40%, quando em nível comercial atinge-se apenas no máximo 16%.

Esse avanço representa uma grande perspectiva para massificação da geração de energia elétrica fotovoltaica. Países, como o Brasil, com potencial médio, na região nordeste, em torno de  $600 \text{ W/m}^2$ , apresentam potencial de utilização dessa forma de conversão energética extremamente significativa, somando-se ao fato de que nossa energia elétrica gerada é em torno de 80% hidrelétrica, que é uma forma das conversões que menos prejudica o meio ambiente.

Esse interesse pelas energias alternativas não se dá, prioritariamente, pela consciência dos malefícios das energias fósseis. Sôfrega busca por essas fontes dá-se pelo aumento sucessivo do preço do barril de petróleo. Foi, assim, na década de 70 onde o preço do barril passou de U\$3.00 para U\$ 40.00 e na presente década o preço do barril superou a marca dos U\$ 150.00. Com esse preço a utilização de energias renováveis pode tornar-se competitiva.

E, assim, o capitalismo, modelo econômico vigente, vislumbra que a utilização de tais fontes pode gerar mais dividendos, além do fato de melhorar a qualidade de vida do planeta. Essa última assertiva vem como adendo. O que mais importa é a política de mais valia, coerente com os pressupostos do capital. Então, para que as fontes renováveis possam realmente vir a ser massivamente utilizadas, o preço do barril terá que está muito alto.

No final de 2008, e até com a eleição do novo presidente dos Estados Unidos que assumiu prometendo investir significativamente em fontes alternativas renováveis, as energias limpas estiveram na mídia como nunca dantes. Porém, com a crise mundial que causou a queda vertiginosa do preço do barril para menos de U\$ 40.00, a indústria dos geradores eólicos que vinha batendo recordes de produção passou até a demitir funcionários. Com o preço atual do petróleo, na ótica capitalista, fica difícil vislumbrar mudanças de rota da energia na direção das fontes alternativas renováveis.

Mas, apesar do modelo dominante não priorizar a saúde planeta, os sinais de que a natureza já não suporta tanto CO<sub>2</sub> são evidentes. O aquecimento global prenunciado e constatado a cada ano conduz a perspectivas catastróficas. Urge que se produza uma mudança de rota na geração energética sob pena de inviabilizarmos a condição de sobrevivência humana no nosso planeta.

E, assim, as nações mais desenvolvidas vão ser obrigadas a seguirem essa reversão de rota, até para garantirem a competitividade tecnológica para a geração por fontes alternativas, pois a “moeda” mais forte é a tecnologia. Nesse sentido, países emergentes, como o Brasil, que não possuem grandes projetos que não utilizam essas fontes, estão sujeitos aos atrasos tecnológicos de mercado e de geração de recursos significativos, condenando o povo a uma exclusão cada vez mais expressiva.

Países sem sol e com pouco vento terão nessas fontes, o domínio da tecnologia e, assim, permanecerão dominando o mundo, através do poder tecnológico. O Japão é um exemplo dessa assertiva, uma vez que sem produzir uma gota de petróleo, é a segunda economia do planeta. Não basta ter matéria prima; é preciso ter conhecimento e capacidade de como industrializá-la.

Outra característica que a utilização das energias alternativas pode trazer é a socialização. Pode-se através do repasse de tecnologias simples produzir condições de geração de emprego e renda para uma parte marginalizada da população que é excluída de todas as benesses que a tecnologia traz, em função de seu ínfimo poder de compra. Um exemplo desse tipo de tecnologia social será a construção de fogões solares, utilizando materiais de baixo custo e até recicláveis, produzindo uma diminuição acentuada da utilização de lenha para cocção de alimentos.

Como se podem ver as energias alternativas renováveis, limpas, passíveis de serem produzidas de forma centralizada, de potenciais quase infinitos, com diversas tecnologias de fabricação, bastante simples e acessíveis a todos os países do mundo, disponíveis em toda as regiões da Terra e ambientalmente corretas, representam uma opção saudável para substituição das energias fósseis que têm causado tantos danos à vida no nosso planeta.

É preciso que os governantes, que decidem os destinos da vida na terra, passam a percebê-las como única saída para minimizar os graves problemas ambientais que a utilização massiva do petróleo vem trazendo. Mesmo dentro do modelo capitalista, tais fontes podem gerar o lucro que é a essência desse modelo.

É verdade que os níveis de investimento precisam ser a cada dia mais intenso para aumentarem a eficiência das tecnologias conversoras de energia, porém já existem tecnologias alternativas capazes de substituírem fontes convencionais.

O aquecimento solar de água, a geração indireta de energia elétrica através do uso de concentradores solares e a conversão direta da energia solar em energia elétrica através do uso das células fotovoltaicas representam aplicações extremamente viáveis e suas utilizações têm crescido, exponencialmente, em todo o mundo, principalmente, nos países mais desenvolvidos.

O Brasil é um país privilegiado em relação ao potencial solar disponível, e a região nordeste apresenta um potencial médio em torno de  $600 \text{ W/m}^2$ , chegando a picos em torno de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Esses potenciais colocam o nordeste brasileiro como uma região extremamente viável para a implantação de quaisquer instalações solares, para suas várias aplicações.

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2007, 45 % do consumo de energia elétrica no Brasil é direcionado para o setor de edificações, sendo 80,0 % correspondente a empresas e residências e 12 % a administração pública, com cifras alcançando 13,8 % do Produto Interno Bruto do país ([www.mme.gov.br](http://www.mme.gov.br)).

O setor residencial responde por 23 % do consumo nacional de energia e o consumo do chuveiro elétrico é o segundo maior em uma residência, correspondendo a 25%, perdendo apenas para o refrigerador/*freezer* que corresponde a 30 %. Sua utilização atinge o horário de pico das 18:00 às 19:00 horas, correspondendo a 8,5 % da demanda nacional de energia neste horário (SANTOS, 2008).

Estes dados apontam a importância da substituição da fonte elétrica pela fonte solar para a obtenção de água quente, principalmente, para diminuir-se o consumo de energia elétrica convencional, aliviando a matriz energética brasileira.

Sendo assim, esse trabalho apresenta a viabilidade térmica e econômica de um sistema de aquecimento solar de água que utiliza um coletor construído a partir da utilização de placas de PVC usadas em forros de ambientes.

Apresenta-se, também, uma inovação em relação aos trabalhos já existentes com esse tipo de superfície de cobertura, que é o revestimento das mesmas com latas de cervejas para a obtenção de uma maior temperatura na placa absorvedora.

Serão estudadas duas configurações, quais sejam: as placas sem revestimento e com revestimento. O tanque de armazenamento é alternativo e de custo bem inferior aos reservatórios térmicos utilizados em sistemas de aquecimento solares convencionais.

O sistema de aquecimento proposto é destinado à obtenção de água quente para o banho de uma família com quatro pessoas em substituição ao chuveiro elétrico.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

Estudar as viabilidades térmicas e econômicas da utilização de um sistema solar de aquecimento alternativo de baixo custo, destinado ao aquecimento de água para banho, que emprega um coletor alternativo composto por placas de PVC usadas em forro de ambientes, para ser utilizado por uma família de quatro pessoas.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

1. Projetar e construir um sistema de aquecimento solar alternativo de baixo custo utilizando placas de forros de PVC;
3. Ensaiar os tipos de coletores construídos;
2. Determinar seus parâmetros térmicos;
3. Demonstrar sua viabilidade para o fim proposto;
4. Comparar os resultados entre os tipos de coletores construídos;
5. Fazer um levantamento comparativo de custo de construção dos coletores em estudo;
6. Avaliar os níveis de degradação inerentes ao uso do PVC como elemento absorvedor de radiação solar;
7. Demonstrar a viabilidade de materiais do coletor proposto.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Importância da Energia Solar

O sol é responsável pelo fornecimento da energia consumida pela humanidade desde seus primórdios. A energia armazenada pelas plantas através da fotossíntese, as modernas hidrelétricas, cujas represas, são abastecidas graças ao ciclo das águas, os geradores eólicos alimentados pelos ventos que são produzidos pelas diferenças de temperatura da atmosfera, os combustíveis fósseis gerados a partir de resíduos orgânicos de tempos primitivos, são exemplos incontestáveis de nossa dependência energética do sol.

Esta utilização da energia é considerada como uma maneira de aproveitamento de forma indireta. Já de modo direto, a energia solar pode ser empregada na produção de calor, potência e energia elétrica, utilizando para isso dispositivos conhecidos como coletores solares.

Estes coletores têm a seu favor o fato de produzirem uma “energia limpa”, de baixo impacto ambiental e não lançarem resíduos prejudiciais ao meio ambiente, durante sua operação. Além disso, a crescente demanda mundial de energia, o progressivo esgotamento das fontes de energia não-renováveis e o problema ambiental que se apresenta como uma questão cada vez mais importante para o futuro da humanidade coloca a energia solar como uma alternativa promissora e que, seguramente, já ocupa um lugar de destaque.

### 2.2 Características da Energia Solar

A energia solar possui uma característica marcante que é a de não ser poluente. Ela pode ser utilizada de forma concentrada ou não. Dependendo da maneira de como for captada, os níveis de temperatura obtidos podem variar desde a temperatura ambiente até alguns milhares de graus centígrados.

A potência da radiação solar que atinge a atmosfera terrestre é cerca de  $1,7 \times 10^{14}$  KW, o que representa mais de 13 milhões de vezes a potência elétrica instalada da usina de Itaipu, a maior do mundo.

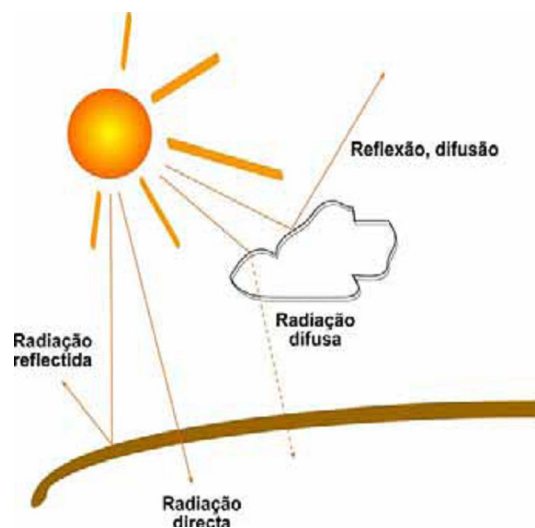
A energia irradiada pelo sol, para a atmosfera terrestre é, praticamente, constante. Esta energia irradiada ou intensidade de radiação é descrita como a constante solar relativa a uma área de  $1 \text{ m}^2$ . O valor médio da constante solar é  $E_0 = 1.367 \text{ W/m}^2$ .(GREENPRO, 2004).

A radiação solar tem diversas componentes: a radiação solar direta  $E_{dir}$  proveniente do sol, que atinge a terra sem qualquer mudança de direção e a radiação difusa  $E_{dif}$ , que chega

aos olhos do observador através da difusão de moléculas de ar e partículas de pó. A radiação difusa inclui, também, a radiação refletida pela superfície terrestre. Na Figura 1 estão ilustrados os componentes da radiação solar. A soma da radiação difusa e direta equivale à radiação solar global  $E_G$ .

$$E_G = E_{dir} + E_{dif} \quad (1)$$

Esta equação, caso não sejam referidas outras condições, refere-se à radiação sobre uma superfície horizontal.



**FIGURA 2.1. Radiação solar global e suas componentes. (GREENPRO, 2004)**

Quando o Sol se localiza verticalmente, acima de uma determinada localização, a radiação efetua o caminho mais curto através da atmosfera. Por outro lado, quando o Sol se encontra num ângulo mais baixo ou no horizonte a radiação percorre um caminho mais longo, sofrendo a radiação solar uma maior absorção e difusão e estando disponível, portanto, uma menor intensidade de radiação.

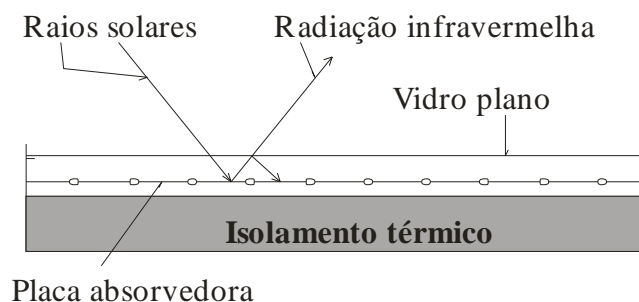
### **2.3 O Coletor solar para aquecimento de líquidos**

O coletor solar para aquecimento de líquidos difere do painel fotovoltaico porque utiliza a energia solar para aquecer um fluido e não para gerar eletricidade. O painel fotovoltaico é composto por um grande número células em forma de discos ou retângulos que geram, individualmente, uma quantidade de energia muito pequena. São nestas células que se dá a conversão da energia radiante do sol em energia elétrica.





proporcionando um aumento de eficiência da conversão. Eficiência, esta, que envolve um grande número de variáveis entre elas: materiais utilizados na fabricação, tipo de superfície absorvedora, intensidade da radiação solar, o número de coberturas transparentes, tipo e espessura do isolamento térmico, as temperaturas de trabalho, entre outras.



**FIGURA 2.2a. Conversão da energia solar em calor**

### 2.3.1 Os coletores alternativos no mundo

O principal objetivo do estudo de coletores alternativos é a redução do custo de fabricação, buscando a socialização do seu uso em sistemas de aquecimento de água doméstico e industrial.

Com este objetivo, vários trabalhos foram desenvolvidos, demonstrando que os coletores solares plásticos de baixo custo têm sido estudados desde os anos 70 (CRISTOFARI, ET AL., 2002).

Os aquecedores solares domésticos de água (SDHW - *solar domestic hot water*) são largamente utilizados atualmente para a produção de energia térmica solar a baixas temperaturas. Estes tipos de coletores têm sido objeto de numerosos estudos e pesquisas desde 1950.

A seguir far-se-á uma breve discussão sobre a história deste tipo de coletor, a nível mundial e local, mostrando os resultados alcançados por várias de suas gerações e as análises que conduziram ao desenvolvimento do presente trabalho.

Willier e Hottel, em 1958 e Bliss, em 1959, estudaram pela primeira vez o desempenho térmico de coletores com tubos paralelos e suas conclusões serviram de base para muitas pesquisas posteriores.

Rivera, em 1994, apresentou trabalho sobre coletor alternativo tubular com múltiplas unidades absorvedoras de PVC. Já Lourenço, em 1997, trabalhou com um coletor alternativo com grade absorvedora formada por múltiplos tubos de alumínio, comprovando a competitividade dos mesmos em relação aos coletores convencionais. Tais coletores foram ensaiados em regime de fluxo forçado. O coletor que usava tubos absorvedores de PVC revelou-se mais viável e mais competitivo em relação ao coletor convencional.

O uso de um polímero absorvedor foi estudado por Van Niekerk et al., em 1996, com o objetivo de avaliar o desempenho de coletores com tubos paralelos na África do Sul. A variação geométrica de parâmetros tais como o diâmetro dos tubos, o espaçamento entre tubos e as dimensões da caixa foram estudadas para a otimização do desempenho dos mesmos.

Matrawy e Farkas, em 1997, compararam um coletor com duas placas paralelas (TPPC), um coletor com tubos paralelos (PTC) e um coletor com tubos em serpentina (STC). Sob o mesmo ambiente e condições de desempenho, a eficiência do TPPC foi 6,0 e 10% maior que o STC e PTC, respectivamente.

Saglietti et al, (1997) estudaram sistema de seis unidades coletoras para aquecimento de água, feitas com tubos pretos de polietileno extrudado de 12,7 mm de diâmetro, dispostos geometricamente na forma espiral. Sendo um projeto de baixo custo, o sistema não recebeu cobertura transparente, ao contrário dos coletores tradicionais. Uma comparação entre os custos dos coletores de polietileno e comercial mostra que o coletor proposto pode ser uma alternativa viável, com valor 1/10 do coletor tradicional, além de ser de fácil instalação e manutenção. Os resultados práticos obtidos foram satisfatórios, recomendando-se sua utilização, principalmente, no meio rural e entre famílias de baixa renda.

CIETEC/SP (Centro Incubador de Empresas Tecnológicas) em 1999 desenvolveu o chamado “Aquecedor Solar de Baixo Custo” – ASBC. Este coletor não possui cobertura. Este sistema para uma família com quatro pessoas é formado três placas coletoras de 0,91 m<sup>2</sup> de PVC interligadas e pintadas de preto e por um reservatório de volume igual a 170 litros. Cada placa coletora é composta por um perfil modular de forro de PVC, com tubos de PVC acoplados as suas extremidades. Funciona em regime de termo-sifão. Os resultados obtidos nos testes foram satisfatórios em comparação com outros coletores alternativos.

Cristofari, et al., propuseram, em 2002, estudar um novo material para a caixa do coletor, que se caracteriza por ter baixa condutividade térmica, maior resistência à corrosão, baixo peso e menor custo. Neste trabalho utilizou-se uma nova metodologia de cálculo onde a capacidade calorífica de vários componentes é levada em conta, permitindo uma simulação dinâmica do comportamento do sistema.

Souza (2004) examinou, comparativamente, dois tipos de coletores, um alternativo e outro plano convencional, demonstrando a competitividade do coletor alternativo com grade absorvedora constituído por múltiplos tubos de PVC em relação ao coletor plano convencional com tubos de cobre.

A Sociedade do Sol (2004), uma ONG de São Paulo construiu um coletor utilizando garrafas pet e embalagens Tetra pak. Este coletor é composto por 80 garrafas pet e tem grade absorvedora formado por oito tubos de PVC ligados em paralelo. Testes realizados com o ABSC e com o coletor de PET mostraram que o ASBC é 17,2% mais eficiente (VARELA, 2004).

Souza (2005) estudou um coletor alternativo constituído por, apenas, três elementos: caixa, grade absorvedora e vidro. A caixa foi confeccionada em material compósito e a grade absorvedora era composta de múltiplos tubos de PVC ligados em paralelo, utilizando uma configuração que permitia a diminuição do espaço entre os tubos. Os resultados obtidos para o rendimento térmico e o baixo custo dos materiais alternativos mostraram a viabilidade deste coletor proposto.

Souza (2006) pesquisou um sistema de aquecimento alternativo de baixo custo composto por um coletor solar alternativo e um reservatório térmico alternativo. O coletor tinha grade absorvedora de PVC e o reservatório foi confeccionado a partir de um tambor de polietileno de 200 litros, utilizado para armazenamento de água e/ou lixo, revestido por material compósito a base de gesso, EPS triturado e água. Sendo os resultados obtidos satisfatórios.

Souza (2007) estudou um sistema de aquecimento alternativo constituído por um coletor com grade absorvedora de tubos de PVC ligados em paralelo através de tês de PVC de mesmo diâmetro e um reservatório térmico alternativo construído a partir de um tambor de polietileno revestido por um cilindro confeccionado em fibra de vidro. Demonstrou-se a viabilidade térmica e de materiais do sistema estudado.

Javier (2008) determinou a eficiência de dois coletores, um convencional e outro com materiais alternativos abundantes na sua região. Avaliou-se o desempenho utilizando um simulador solar e depois em condições reais de operação. Demonstrou que o coletor com materiais alternativos, funciona tão bem quanto um coletor construído com materiais convencionais.

Leal (2008) construiu um modelo de coletor solar térmico, para aquecimento de água, produzido com materiais recicláveis e de baixo custo (tubos em PVC, caixas acartonadas

Tetra pak e garrafas PET pós-consumo) e que apresentou uma relação custo/benefício extremamente competitiva se comparado aos modelos industriais.

Silva A, et al (2008) desenvolveram uma ferramenta para simulação numérica de sistemas de aquecimento de água utilizando energia solar, baseado nos modelos apresentados na literatura. O modelo de simulação exposto em seu trabalho permite calcular a radiação solar total incidente no coletor, levando em consideração as características da cobertura, a simulação do desempenho do coletor, e prediz o perfil de temperatura do tanque de acumulação de água quente, considerando perfil de carga térmica a ser suprida, e a temperatura estratificada.

Souza (2008) construiu um sistema de aquecimento de água solar trabalhando em regime de termo-sifão, constituído por dois coletores alternativos e um reservatório armazenador de água também alternativo. Os coletores foram construídos a partir da utilização de garrafas PET, latas de alumínio, de tubos de PVC de ½” e os reservatórios térmicos a partir de um tambor de polietileno de 250 litros, revestido por um cilindro de fibra de vidro, tendo EPS triturado entre as duas superfícies. Mostrou-se que tal sistema de aquecimento alternativo proposto pode ser usado para aquecimento de água apresentando bons resultados.

Neto et al (2008) apresentaram análises técnicas e econômicas, para dois coletores solares não convencionais de plástico e quatro coletores convencionais. Os dados desses coletores foram obtidos de seus fabricantes e utilizados nas análises técnicas e econômicas. Foi fabricado um coletor não convencional para testes no laboratório. Um dos coletores de plástico apresentou índices econômicos compatíveis com um coletor convencional. Foram relacionadas neste trabalho três variáveis: a produção mensal específica de energia, a durabilidade e o custo inicial dos coletores.

Krenzinger (2008), Pozzebon (2008) exibiram um software de simulação de aquecimento de água, Termosim, suas interfaces gráficas e discussões sobre os modelos matemáticos aplicados nos seus componentes, apresentando-o como ferramenta indispensável nas análises de comportamento térmico dos sistemas de aquecimento de água por energia solar. Os modelos matemáticos do coletor solar e balanço térmico do tanque foram validados com o confronto dos resultados experimentais de Siqueira (2003).

Ferreira et al (2008) analisaram a viabilidade técnica da redução do uso de energia elétrica pela substituição dos chuveiros elétricos por aquecedores solares. Demonstraram as viabilidades técnica, econômica e ambiental da substituição dos chuveiros elétricos pelos sistemas aquecedores / reservatórios.

Santos (2008) construiu um coletor alternativo utilizando garrafas PET, latas de cervejas e refrigerantes e tubos de PVC de ½”. A grade absorvedora era formada por oito tubos de PVC, ligados através de conexões T do mesmo material e diâmetro. No interior das unidades aquecedoras em número de 48, formadas por duas garrafas PET, com o tubo no interior, foram colocadas duas aletas, fabricadas com as latas de cerveja e refrigerantes, envolvendo o tubo para aumentar a área de absorção da radiação solar. Os resultados evidenciou que tal coletor alternativo apresenta viabilidade térmica, econômica e de materiais.

Molero (2008) apresentou um modelo matemático multidimensional e transitório para coletores solares planos. Usando o método dos elementos finitos foi possível prever o comportamento de diferentes configurações: coletores de tubo paralelo, de serpentina ou de placas paralelas, juntamente com outras possibilidades não usuais como o uso de fluidos absorventes com placa superior semitransparente. O modelo foi validado com os resultados experimentais de um coletor solar comercial de tubos paralelos onde se obteve uma grande similaridade entre a curva de rendimento real e a simulada.

Fasulo et al (2008) estudaram as vantagens e limitações que possuem o policarbonato celular. Concluíram que este material não está apto para trabalhar em contato permanente com a água. Os resultados mostraram que o material mantém suas propriedades dentro das 500 horas de exposição.

O uso de coletores com tubos para absorção de polipropileno e placas de absorção de polietileno de alta densidade é bastante focado pela literatura. Esses coletores são usados para aquecimento e climatização de piscinas (SOUZA, 2007).

Os coletores alternativos têm-se constituído na principal linha de pesquisa no âmbito do Laboratório de Máquinas Hidráulicas e Energia Solar da UFRN, já tendo sido desenvolvidas, construídas e estudadas várias gerações destes tipos de coletor. Busca-se, de forma prioritária, o barateamento do custo de fabricação de um sistema de aquecimento de água solar.

## **2.4 O cloreto de polivinila - PVC**

### **2.4.1 Generalidades**

O cloreto de polivinila (PVC) é um componente da família vinila. Seu valor comercial resulta de várias características que podem ser traduzidas em duas palavras, versatilidade e durabilidade.

Sua versatilidade se traduz pela utilização de seus produtos nas mais diversas finalidades, desde a condução de água fria e esgotos, até a impermeabilização de barragens. É importante destacar que na maioria dos casos, a utilização de componentes de PVC implica na diminuição do custo do sistema instalado e em todos os casos, o uso desses componentes permite que o sistema tenha um bom desempenho ao longo de toda a sua vida útil, com manutenção de mais baixo custo.

Sua durabilidade está associada ao fato de que os componentes utilizados na construção civil têm vida útil superior a 20 anos e, em alguns casos 50 anos. É essencial notar que o PVC, por ser um plástico, não sofre corrosão. Além disso, os compostos de PVC utilizados na fabricação de componentes de construção civil trazem incorporados produtos, tais como antioxidantes, estabilizantes ao ultravioleta, que permitem a manutenção de suas propriedades ao longo de toda a vida útil.

### 2.4.2 Obtenção do PVC

O PVC é o único material plástico que não é 100% originário do petróleo. Em termos estequiométricos o PVC é obtido a partir de 56,8% de cloro, proveniente do cloreto de sódio, e 43,2% de insumos provenientes de fontes não renováveis como o petróleo e o gás natural (Mei, et al, 2007). A principal matéria-prima do PVC é o sal marinho, um recurso natural renovável. A Figura 2.3 mostra o fluxograma de fabricação do PVC e sua fórmula química.

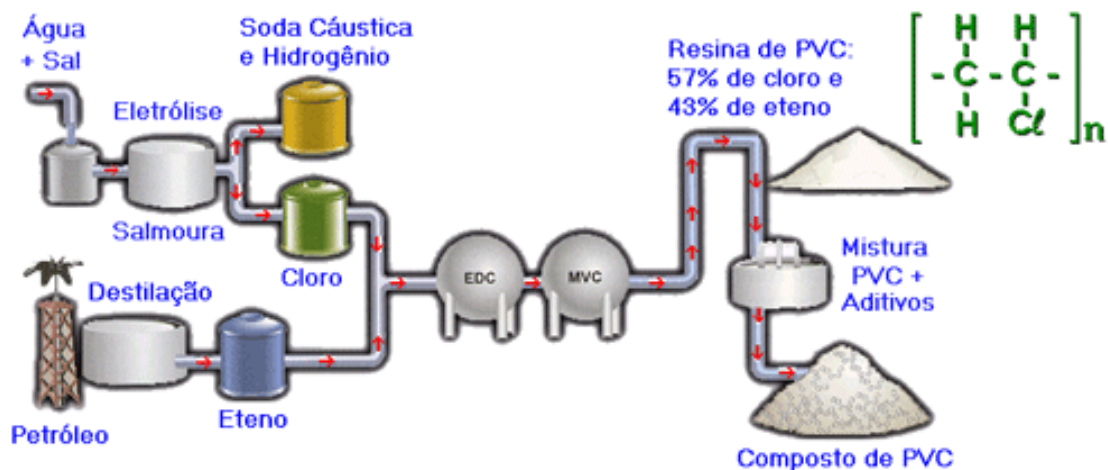


FIGURA 2.3. Fluxograma de fabricação do PVC

Fonte: [www.institutodopvc.org](http://www.institutodopvc.org)

### 2.4.3 Principais características do PVC

Algumas propriedades demonstram a versatilidade, a durabilidade e a viabilidade do uso do PVC através do seu uso bastante difundido em várias aplicações de uso cotidiano da população.

A Tabela 2.1 mostra as principais propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, óticas e químicas do PVC. (SANTOS, 2008)

**Tabela 2.1. Principais propriedades do PVC.**

Propriedades	Valor
Peso molecular (PM)	50.000-100.000
Peso específico ( $\rho$ )	1,4 g/cm <sup>3</sup>
Resistência à Tração ( $R_T$ )	40,7 – 51,7 MPa
Módulo de Elasticidade (E)	2,4 – 4,1 GPa
Tensão de Escoamento (TE)	40,7 – 44,8 MPa
Resistência à Compressão ( $R_C$ )	57,5 MPa
Resistência à Flexão ( $R_F$ )	120 MPa
Coefficiente de dilatação térmica	(60 a 80) x 10 <sup>6</sup> (°C) <sup>-1</sup>
Coefficiente de Expansão Térmica Linear ( $e_t$ )	0,9 - 1,8 x 10 <sup>-4</sup> (°C) <sup>-1</sup>
Temperatura de Distorção ao Calor (HDT)	75 °C
Índice de Refração ( $I_R$ )	1,57
Absorção de água em 24h (%)	0,04-0,40

Essas propriedades listadas, na tabela acima, é o que torna o PVC:

1. Leve, o que facilita seu manuseio e aplicação;
2. Resistente à ação de fungos, bactérias, insetos e roedores;
3. Resistente à maioria dos reagentes químicos;
4. Bom isolante térmico, elétrico e acústico; condutibilidade térmica (0,15 a 0,21 W/m.K);
5. Sólido e resistente a choques;
6. Impermeável a gases e líquidos;
7. Resistente às intempéries (sol, chuva, vento e atmosferas salinas).

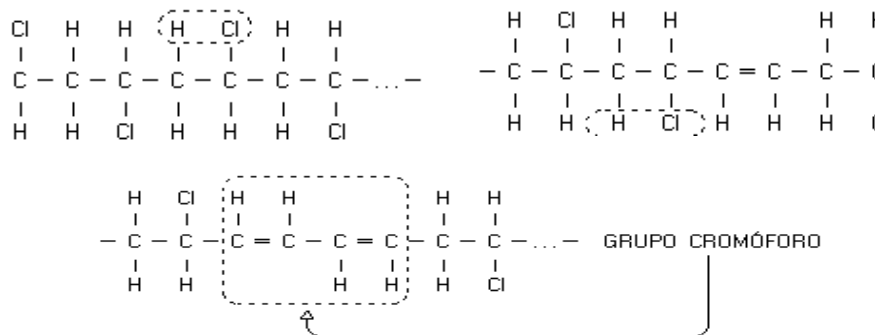


### 2.5 A degradação do PVC

O coletor em estudo, além da placa absorvedora de PVC, como já descrito, utiliza também tubulação de água de PVC. A degradação é devido ao calor, radiação ultravioleta, ou ainda, radiação gama, efeitos esses que já são, de certa forma, minimizados com adição de estabilizantes. Souza (2002) pesquisou os processos de degradação inerentes ao uso de tubos absorvedores de PVC em coletores solares.

Os tubos de PVC não são transparentes, pois alguns aditivos são adicionados para conferir maior resistência e durabilidade a estes. O PVC é um polímero linear, o que o faz ser um termoplástico (aqueles que podem ser amolecidos pelo calor quantas vezes quisermos e, ao resfriarem, voltam a apresentar as mesmas propriedades iniciais).

O processo de degradação no PVC sem aditivos é revelado, normalmente, pela mudança de coloração para amarelo, até o marrom escuro. Esse processo é conhecido como desidrocloração e a figura 2.4 apresenta-o de forma simplificada (SOUZA, 2002). É amplamente aceito que a desidrocloração envolve uma reação progressiva entre átomos de cloro e hidrogênio vizinhos ao longo da cadeia polimérica, sendo formada uma ligação dupla entre os átomos de carbono nas posições em que os dois átomos estavam originalmente ligados; forma-se assim uma estrutura de cloro alílico com o próximo átomo de cloro da cadeia polimérica, átomo de cloro este altamente ativado, que dá prosseguimento ao processo de degradação.



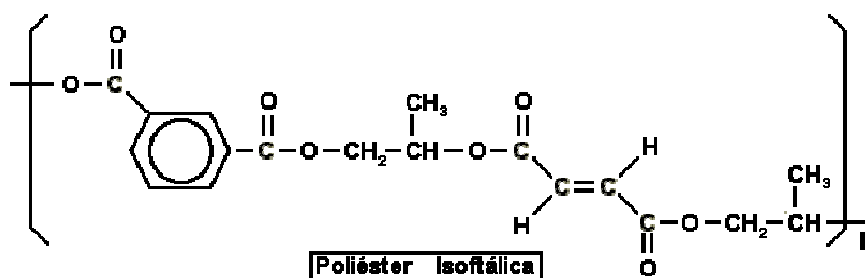
**FIGURA 2.4. Reação de degradação do PVC**

## 2.6 A resina poliéster

A placa absorvedora em estudo foi unida aos tubulões através da resina isoftálica que é uma resina fenólica líquida tipo “resol”, diluída em etanol, com aspecto límpido transparente e cor âmbar avermelhada.

Esta resina é indicada especialmente para pultrusão de PRFV (Fibra de vidro). O ácido isoftálico não forma anidrido cíclico, não sofre desvantagem de regeneração, como no caso das ortoftálicas, e conseqüentemente, podem ser obtidos poliésteres de alto peso molecular, ou seja, com cadeias mais longas. Tais cadeias conferem ao produto final maior resistência mecânica, pois absorvem melhor impactos. Conseqüentemente tornam-se polímeros de maior resistência *química e térmica*.

Nas condições de fornecimento, a resina isoftálica apresenta a seguinte configuração esquemática da figura 2.5.



**FIGURA 2.5. Esquema da estrutura da Resina Isoftálica**

Os principais tipos de resinas utilizadas e suas características fundamentais são apresentados na tabela 2.2.

**Tabela 2.2. Principais tipos de resinas e suas características fundamentais.**

<b>Ortoftálica</b>	Resina mais comum de menor custo para usos básicos não nobres. Bijuterias, artesanato, laminação em reforço de fibra, gel-coat <i>primer</i> .
<b>Tereftálica</b>	Possui resistências físicas pouco superiores a ortoftálica porém baixa resistência a UV. Laminação em reforço de fibra, embutimento eletrônico e artesanato.
<b>Isoftálica</b>	Melhores características mecânicas, químicas e térmicas que as anteriores. Laminados expostos a intempéries.
<b>Isoftálica c/ NPG</b>	O NPG melhora a resistência a hidrólise. Peças e laminados expostos a ataques químicos leves e contato direto com água.
<b>Bisfenólica</b>	Possui melhores características químicas e térmicas. Peças e laminados expostos a ambientes agressivos e temperaturas elevadas.

## 2.7 O EPS (Isopor)

O EPS (poliestireno expandido) é um plástico celular e rígido, que pode apresentar uma variedade de formas e aplicações. Apresenta-se como uma espuma moldada, constituída por um aglomerado de grânulos. (MANO, 1999).

Duas características do isopor têm fortalecido a sua presença no mercado consumidor, aonde vem obtendo crescente participação: a leveza e a capacidade de isolamento térmico, às quais ainda se associa ao baixo custo.

É bastante utilizado na confecção de caixas térmicas para acondicionamento de alimentos e bebidas devido a sua estrutura de células fechadas cheias de ar (97% de seu volume) dificultando passagem do calor.

Na construção civil é muito utilizado devido a sua leveza reduzindo, substancialmente, o peso das construções.

Na tabela 2.3 são apresentadas as principais propriedades do EPS.

**Tabela 2.3. Principais propriedades do EPS.**

Propriedades	Valor
Condutibilidade térmica(K)	0,030 a 0,040 W/m°C
Peso específico ( $\rho$ )	10 - 30 kg/m <sup>3</sup>

### A. Algumas propriedades do EPS (isopor)

#### a.1 Absorção de água

O EPS não é higroscópico. Quando imerso em água ele absorve, apenas, pequenas quantidades de água, devido à sua estrutura de células fechadas e ao fato de as paredes das células serem impermeáveis à água; esta fica retida nos poucos espaços entre as células. Isso significa que o isopor volta a secar, facilmente, sem perder qualquer das suas propriedades e que os valores de absorção diminuem com o aumento da massa volumétrica.

Esta propriedade é muito importante devido ao fato da água deteriorar a capacidade de isolamento de um material isolante térmico. No caso do isopor, devido a sua fraca absorção de água, este mantém grande parte de sua capacidade de isolamento. Verificamos uma redução do Coeficiente de Condutibilidade Térmica de 3-4%, para cada 1% de volume de água absorvido.

## a.2 Propriedade térmica do EPS

A propriedade mais ressaltante do EPS é sua capacidade de resistir à passagem do calor. Isto se deve a sua estrutura celular, que é constituída por muitos milhões de células fechadas com diâmetros de alguns décimos de milímetros e com paredes de 1 mm. Esta espuma é composta, aproximadamente, por 2% de poliestireno e 98% de ar. Assim, o fator decisivo para a boa capacidade de isolamento térmico do EPS é o de manter, permanentemente, uma grande quantidade de ar, quase imóvel, dentro das suas células.

A capacidade de isolamento térmico é expressa no Coeficiente de Condutibilidade Térmica (CCT), habitualmente, medido em  $[W/m^{\circ}C]$ . Um coeficiente menor denota uma capacidade de isolamento térmico superior.

Para efeito de cálculo, o valor do CCT do EPS é de 0,04  $[W/m^{\circ}C]$ . Assim com um emprego de massa volumétrica apropriada, de matérias primas específicas, bem como, a adaptação das condições de fabrico, é possível a obtenção de valores de CCT inferiores.

## a.3 Propriedades mecânicas do EPS

As propriedades mecânicas mais relevantes do EPS relacionam-se com as condições de manuseamento e aplicação. Estas são as resistências à compressão, flexão e tração e são apresentadas na tabela 2.4.

**Tabela 2.4. Propriedades mecânicas do EPS.**

<b>Propriedades</b>	<b>Valor</b>
Resistência à compressão com deformação a 10%	$\geq 33$ KPa
Resistência a flexão	$\geq 50$ KPa
Resistência à tração	$\geq 0,2$ MPa

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Processos de construção, Montagem e Ensaio do sistema de aquecimento de água proposto.

O sistema de aquecimento construído é formado por placas de forro de PVC alveolar usadas em forros de ambientes, unidas em paralelo e alimentadas por dois tubos de PVC marrom ( $\varnothing 40$  mm e  $\varnothing 32$  mm) um por dentro do outro, e de um reservatório térmico também com materiais alternativos. A seguir são apresentadas as principais características do coletor e do reservatório.

A superfície absorvedora é formada por cinco placas de PVC com 1,46 m de comprimento cada, unidas por encaixe, tendo cada uma 20 cm, totalizando 1,02 m de largura. Nas extremidades dos tubos ligados as placas têm os tubos de entrada e saída de fluido ( $\varnothing 20$  mm).

A placa coletora foi pintada com esmalte sintético preto fosco para uma melhor absorção da radiação solar global incidente.

Para a união entre as placas de PVC e os tubos de distribuição de água fez-se um rasgo nos tubos, utilizando-se furadeira e serra metálica. Para a vedação da união entre as duas superfícies (placa com os tubulões) foi utilizada resina isoftálica tendo como aditivo talco. A Figura 3.1 mostra um modelo do coletor proposto construído.



**Figura 3.1. Modelo do sistema coletor alternativo proposto.**

- A) O processo de *fabricação* do coletor compreendeu as seguintes etapas.
1. Marcação e corte dos Tubos de PVC ( $\varnothing 40$  mm) com 1,15 m de comprimento
  2. Marcação e corte dos Tubos de PVC ( $\varnothing 32$  mm) com 1,25 m de comprimento.
  3. Confeção dos rasgos nos tubos de distribuição de água ( $\varnothing 40$  mm e 32 mm), através de uma serra.



**Figura 3.2.** Abertura do rasgo nos tubos de distribuição de água.



**Figura 3.3.** Tubos de distribuição ( $\varnothing 40$  mm e  $\varnothing 32$  mm) com os rasgos concluídos.

4. Marcação e corte das placas de forro de PVC



**FIGURA 3.4. Marcação das placas de PVC.**



**FIGURA 3.5. Corte das placas de PVC.**

B) O processo de *montagem* do coletor proposto compreendeu as seguintes etapas.

1. Montagem dos tubos de distribuição de água (Tubulões).



**FIGURA 3.6. Colocação do tubo Ø32 mm no interior do tubo de Ø40 mm.**



**FIGURA 3.7. Tubo de Ø32 mm já no interior do tubo de Ø40 mm.**

2. Montagem das placas nos tubos de distribuição



**FIGURA 3.8a**



**FIGURAS 3.8b**

**FIGURAS 3.8a e 3.8b. Encaixe do tubo de distribuição em uma das extremidades das placas.**



**Figura 3.9a**



**Figura 3.9b**

**FIGURA 3.9a e 3.9b. Encaixe da outra extremidade das placas nos tubos de distribuição.**





**Figura 3.10. Verificação das dimensões do coletor antes da aplicação da resina Isoftálica.**

3. Fixação das placas de PVC aos tubos de distribuição através da resina isoftálica.



**Figura 3.11. Utilização da resina Isoftálica para fixação da Placa ao tubo de distribuição.**

4. Aplicação da resina isoftálica nos tubos distribuição após secagem da etapa anterior.



**Figura 3.12. Aplicação da Resina Isoftálica por entre os tubos de distribuição.**

5. Colocação das conexões de Entrada e Saída de água no coletor.



**FIGURA 3.13. Saída de água quente do coletor.**



**Figura 3.14. Entrada de água quente do coletor.**

6. Aplicação da tinta de cor preta fosca na parte absorvedora do coletor.



**FIGURA 3.15**



**FIGURA 3.16**

**Figuras 3.15 e 3.16. Pintura de cor preta fosca na placa coletora.**

7. Realização do teste final de vazamento na condição de trabalho.



**Figura 3.17. Teste de Vazamento.**

8. Realização do acabamento final com a tinta de cor preta fosca no coletor após teste de vazamento.



**FIGURA 3.18. Acabamento final do coletor.**

O Sistema de aquecimento de água pronto para os testes encontra-se mostrado na figura 3.19. Na figura 3.20 temos o detalhe do termopar na entrada de água do coletor.



**FIGURA 3.19**



**FIGURA 3.20**

A principal característica desse coletor é a área de exposição à radiação solar que é igual à área de absorção da mesma, o que representa um fator importante para uma melhor eficiência de um coletor solar.

Os reservatórios térmicos alternativos **RT 150** e **RT 200**, de volumes correspondentes a 150 e 200 litros, respectivamente, foram confeccionados a partir de um tambor de polietileno de 200 litros. O tambor foi aberto em sua tampa superior e foi colocado no interior de um tambor confeccionado em fibra de vidro com espessura em torno de 5,0 mm. A tampa dos reservatórios foram construídas em fibra de vidro. No espaço entre os dois elementos básicos, cilindro de fibra e tambor de polietileno foi colocado uma camada de EPS triturado (Santos, 2008). Os reservatórios térmicos **RT200** e **RT 150** encontram-se mostrados na figura 3.21.



**Figura 3.21. Reservatórios térmicos RT 200 e RT 150 do sistema de aquecimento solar utilizados.**

O Sistema de aquecimento solar de água construído foi ensaiado para dois tipos de configuração, para dois volumes do tanque armazenador, com três configurações estudadas.

**A) CONFIGURAÇÃO I:** 1(UM) COLETOR SOLAR SEM REVESTIMENTO + RESERVATÓRIO DE 150 LITROS (RT150);

B) **CONFIGURAÇÃO II:** 1(UM) COLETOR SOLAR COM REVESTIMENTO + RESERVATÓRIO DE 150 LITROS (RT150);

C) **CONFIGURAÇÃO III:** 1(UM) COLETOR SOLAR COM REVESTIMENTO + RESERVATÓRIO DE 200 LITROS (RT200).

O sistema de aquecimento proposto funciona em regime de termo-sifão, para o volume de água de 150 e 200 litros e foram ensaiados para a determinação de sua eficiência térmica, sendo levantados os seguintes parâmetros a seguir descritos que o caracterizam e são necessários para a análise do seu desempenho térmico, como também a susceptibilidade da placa absorvedora e dos tubos, ambos de PVC, de atingirem o nível crítico para o início da degradação térmica em torno de 60 °C. A inclinação em relação à horizontal dada aos coletores foi de 15,5° S isso em função da latitude do local, no caso de Natal, que é de 5,5° S.

Foram medidas as **temperaturas de entrada ( $T_{\text{entrada}}$ ) e saída ( $T_{\text{saída}}$ ) do fluido do coletor, as temperaturas da superfície inferior e superior da placa absorvedora, temperatura da água contida no reservatório e radiação solar global.**

As temperaturas de entrada e saída do fluido foram medidas entre 8:00 e 15:00 horas, a cada de 30 minutos; as temperaturas da placa absorvedora foram medidas entre 11:00 e 13:00 horas, período de radiação máxima e constante. A temperatura final da água aquecida foi medida após as 7(sete) horas de funcionamento.

Os ensaios foram realizados em dias de boas condições solarimétricas, altos índices de radiação solar global e baixa nebulosidade para permitir uma análise comparativa mais real entre os vários dias de ensaio.

A susceptibilidade ao início do processo de degradação térmica pode ser diagnosticada através dos níveis de temperatura alcançados pela superfície externa dos tubos absorvedores, que não devem alcançar 60°C.

A autonomia do sistema foi também avaliada no que diz respeito ao número de dias em que o sistema esteve apto para propiciar água quente na temperatura ideal de banho para uma residência com quatro pessoas.

Os banhos foram simulados às 07:00, 12:00 e 18:00 horas, retirando-se 40 litros de água quente do reservatório térmico de 150 litros, através de um registro localizado a 2/3 de sua altura, a partir de sua base. Ressalte-se que a simulação dos banhos deu-se numa condição mais crítica do que a que ocorre na situação real, sem a mistura da água quente do reservatório com a água fria proveniente da rede.

Para testar a eficiência térmica do reservatório alternativo encheu-se o mesmo e o interligou ao coletor proposto. Após um dia de funcionamento do sistema de aquecimento, às 15:00 horas, mediu-se a temperatura da água contida no reservatório, correspondente a 45,3°C e cortou-se a comunicação do mesmo com o coletor para evitar a troca térmica entre o reservatório e o coletor durante a noite.

Colocou-se um termopar de cromel-alumel no interior do reservatório térmico alternativo proposto para medir a temperatura da água, outro na superfície externa do mesmo para medir sua temperatura e outro para medir a temperatura ambiente. O teste consistiu em medir essas temperaturas, a cada hora, durante toda a noite para quantificar a queda de temperatura na massa de água contida no reservatório. As temperaturas foram medidas utilizando um termômetro digital, com precisão de  $0,1\% \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

O sistema de aquecimento alternativo proposto, nas suas duas configurações, com e sem revestimento metálico na placa de absorção, encontra-se mostrado nas figuras 3.22, 3.23 e 3.24, respectivamente. Na figura 3.22 é mostrado também, o sentido do fluxo da água para todas as configurações.



**FIGURA 2.22.** Sistema de aquecimento solar sem revestimento metálico (CONFIGURAÇÃO I).





**FIGURA 3.23. Sistema de aquecimento solar com revestimento metálico (CONFIGURAÇÃO II).**



**FIGURA 3.24. Sistema de aquecimento solar sem revestimento metálico (CONFIGURAÇÃO III).**

## 3.2. Desenvolvimento teórico

Os parâmetros que melhor caracterizam a eficiência térmica de um coletor solar são o **rendimento térmico, a potência perdida e o coeficiente global de perdas.**

### 3.2.1. Coeficiente global de perdas

A placa coletora após receber radiação se aquece, surgindo, em consequência, um gradiente de temperatura entre a mesma e o ar ambiente, fazendo com que parte da energia captada flua da placa absorvedora para a atmosfera, que se constitui nas perdas térmicas do coletor por condução, convecção e radiação pelo topo, base e laterais do coletor solar. O parâmetro que engloba todas essas perdas é o Coeficiente Global de Perdas ( $U_{perdas}$ ), dado em  $W/m^2.K$ , pode ser determinado por quatro métodos distintos, quais sejam: Método da temperatura média da placa, Método da Perda Térmica, Método das Trocas Térmicas e Método da Inversão de Fluxo (**DUFFIE&BECKMAN, 1991**).

Como o Método da Inversão de Fluxo requer um controle rígido de vários parâmetros, necessitando, por conseguinte, de um aparato tecnológico de grande sofisticação, resolveu-se demonstrar esse parâmetro a partir dos outros métodos, que a seguir são descritos.

### 3.2.2. Método da temperatura média da placa

Para determinar-se o Coeficiente Global de Perdas ( $U_{perdas}$ ) através desse método torna-se necessário o conhecimento da potência útil transferida ao fluido de trabalho ( $P_u$ ), da radiação solar global ( $I$ ), dos parâmetros ópticos do coletor, absorvidade da placa ( $\alpha_p$ ), da temperatura média da placa absorvedora ( $T_{mp}$ ) e da temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ). A equação (3.1) permite a determinação da grandeza pretendida:

$$U_{perdas} = \frac{(\alpha_p - \eta_t) I}{(T_{mp} - T_{amb})} \quad (3.1)$$

onde:

$\alpha_p$  = absorvidade da placa.

$\eta_t$  = rendimento térmico, em %.

$T_{mp}$  = temperatura média da placa absorvedora, em K.

$T_{amb}$  = temperatura ambiente, em K.

$I$  = radiação solar global, em  $kW/m^2$

### 3.2.3. Método da perda térmica

Este método consiste na determinação do Coeficiente Global de Perda Térmica através do conhecimento dos parâmetros potência absorvida pelo coletor ( $P_{abs.}$ ), potência transferida ao fluido de trabalho ( $P_u$ ), temperatura média de placa ( $T_{mp}$ ) e temperatura ambiente ( $T_a$ ), da área do coletor ( $A$ ), da vazão mássica ( $\dot{m}$ ), do calor específico do fluido ( $c_p$ ) e da diferença de temperatura do fluido obtida no sistema ( $\Delta T$ ), conforme as equações (3.2) a (3.5).

$$P_{abs} = \alpha_p \cdot I \cdot A \quad (3.2)$$

$$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.3)$$

$$P_p = P_{abs} - P_u \quad (3.4)$$

$$U_{perdas} = \frac{P_p}{A \cdot (T_{mp} - T_a)} \quad (3.5)$$

### 3.2.4. Método das trocas térmicas

Este método se caracteriza pela determinação do  $U_{perdas}$  como função de todas as trocas térmicas que ocorrem no interior e para o exterior do sistema. Essas trocas sob a forma de convecção, condução e radiação, ocorrem nas unidades de aquecimento, conforme a equação 3.6 (INCROPERA, 2003).

$$U_{perdas} = U_{topo} + U_{base} + U_{laterais} \quad (3.6)$$

Onde:

$U_{topo}$  = Perdas térmicas por cima do coletor;

$U_{base}$  = Perdas térmicas por baixo do coletor

$U_{laterais}$  = Perdas térmicas pelas laterais do coletor.

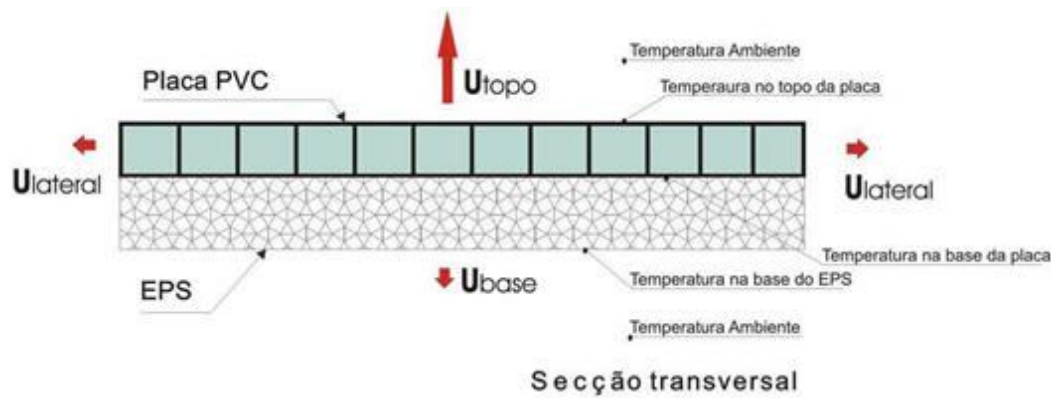
#### 3.2.4.1. Perdas pela cobertura ( $U_{topo}$ )

As perdas pela parte de cima do coletor solar compreendem modos de transmissão de calor, do tipo convecção e radiação, entre a placa absorvedora e o ar atmosférico que envolve o sistema.

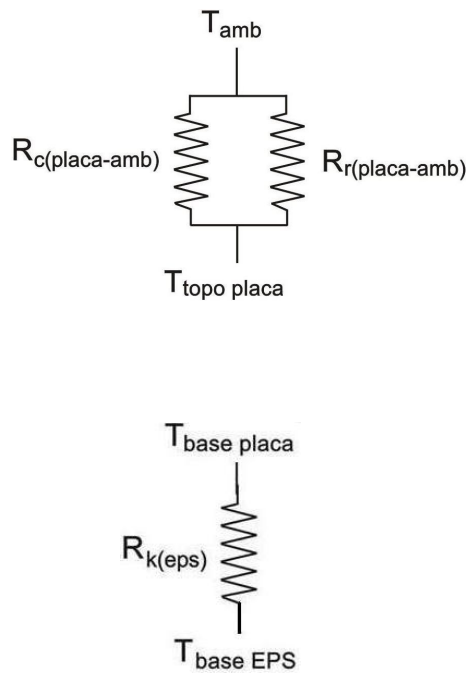
Para calcular as perdas pelo topo utilizando esse método adotam-se as seguintes condições:

1. As temperaturas da placa absorvedora são uniformes em toda sua extensão e espessura;
2. Não há acumulação de energia na placa absorvedora, considerando-se, portanto, regime permanente;
3. Os fluxos de calor envolvidos são unidimensionais, havendo, portanto, propagação perpendicular às superfícies consideradas.

A Figura 3.25 mostra uma secção transversal da placa absorvedora em estudo apresentando as trocas térmicas entre o mesmo e o meio que a envolve. E a figura 3.26 mostra o circuito térmico do respectivo coletor.



**FIGURA 3.25. Secção transversal do coletor em estudo.**



**Figura 3.26. Circuito térmico do coletor em estudo**

Sendo que:

$R_c$  (placa - amb) = Resistência convectiva entre a superfície externa da placa e o ar ambiente, em (K/W).

$R_r$  (placa - amb) = Resistência radiativa entre a superfície externa da placa e o ar ambiente, em (K/W).

$R_k$  (eps) = Resistência condutiva do isolante térmico (EPS), em (K/W).

$T_{amb}$  = Temperatura ambiente, em (K).

$T_{topo\ placa}$  = Temperatura no topo da placa, em (K).

$T_{base\ placa}$  = Temperatura na base da placa, em (K).

$T_{base\ eps}$  = Temperatura na base do isolante térmico (EPS), em (K).

O coeficiente de perda pela cobertura (topo) é dado pela equação (3.7).

$$U_{topo} = \frac{1}{\Sigma R_{eq}} \quad (3.7)$$

Do circuito térmico da figura 3.28, tem-se que:

$$\Sigma R_{eq} = R_{eq(placa - amb)} \quad (3.8)$$

Logo,

$$U_{topo} = \frac{1}{R_{eq\ placa - amb}} \quad (3.9)$$

Onde:

$$R_{eq(placa\ amb)} = \frac{1}{\frac{1}{R_c(placa - amb)} + \frac{1}{R_r(placa - amb)}} \quad (3.10)$$

Substituindo-se as equações (3.10) em (3.9), tem-se a equação (3.11) dada por:

$$U_{topo} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{R_c(placa - amb)} + \frac{1}{R_r(placa - amb)}}} \quad (3.11)$$

$$U_{topo} = \frac{1}{\frac{1}{h_c(placa-amb) + h_r(placa-amb)}}$$

Onde:

$h_{c(placa - amb)}$  = coeficiente de transmissão de calor por convecção entre a superfície externa da placa e ao ar ambiente, em  $W/m^2.K$ .

$h_{r(placa - amb)}$  = coeficiente de transmissão de calor por radiação entre a superfície externa da placa o ar ambiente, em  $W/m^2.K$ .

Para calcular o coeficiente de transferência de calor convectivo entre a placa absorvedora e o ar, utilizam-se as equações mostradas a seguir.

$$R_{eL} = \frac{V.L}{\nu} \quad (3.12)$$

$$N_{UL} = 0,665.R_{eL}^{1/2}.Pr^{1/3} \quad (3.13)$$

$$h_c = \frac{N_{UL}.K}{L} \quad (3.14)$$

Onde:

$h_c$  = coeficiente convectivo ( $W/m^2.K$ )

$R_{eL}$  = número de Reynolds

$V$  = velocidade do ar (m/s)

$L$  = largura da placa absorvedora (m)

$\nu$  = viscosidade cinemática do ar ( $m/s^2$ )

$N_{uL}$  = número de Nusselt

$Pr$  = número de Prandtl

$K$  = condutividade térmica do ar ( $W/m.K$ )

O coeficiente de troca térmica radiativa entre a superfície externa da placa absorvedora e o ambiente, conforme **Duffie&Beckman**,1991, pode ser determinado através da equação (3.13).

$$h_{r(placa - amb)} = 5,16.10^8 . \epsilon_{placa} \frac{(T_{placa}^4 - T_{amb}^4)}{(T_{placa} - T_{amb})} \quad (3.13)$$

Onde:

$T_{placa}$  = temperatura externa da placa, em K.

$T_{amb}$  = temperatura ambiente, em K.

$\varepsilon_{placa}$  = emissividade da placa absorvedora.

### 3.2.4.2. Perdas pelas laterais e base do coletor ( $U_{laterais}$ , $U_{base}$ )

Consideram-se as perdas laterais desprezíveis em função da pequena espessura da placa absorvedora, que apresenta insignificante área lateral. Uma maneira simplificada de se obter as perdas pela base do coletor é considerar o fluxo de calor que sai do sistema por condução através do isolante e calcular o coeficiente global de perdas de calor para esta situação, conforme a equação (3.14).

$$U_{base} = \frac{1}{\frac{e_{eps}}{k_{eps}}} \quad (3.14)$$

**Onde:**

$e_{eps}$  = espessura do isolamento, em m.

$k_{eps}$  = condutibilidade térmica do isolante, em W/m.K.

## 3.5. Determinação do rendimento térmico

$$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (3.15)$$

$$\eta_t = \frac{P_u}{A \cdot I} \quad (3.16)$$

$P_u$  = potência total útil transferida ao fluido de trabalho, em kW.

$I$  = radiação solar global, em kW/m<sup>2</sup>.

$A$  = área do coletor (área exposta à radiação solar), em m<sup>2</sup>.

$\dot{m}$  = vazão mássica, em kg/s.

$c_p$  = calor específico da água, em KJ/kg K.

$\Delta T$  = gradiente de temperatura entre entrada e saída do fluido, em K.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Neste capítulo serão avaliados os resultados dos ensaios realizados para três configurações para levantamento do desempenho do coletor proposto. Serão analisadas também as perdas térmicas dos coletores e reservatórios alternativos construídos no LMHES da UFRN. Serão mostrados a seguir os dados gerais médios horários de cada dia, bem os dados médios diários dos ensaios feitos para cada tipo de configuração.

### 4.1. Resultados de parâmetros térmicos para determinação da eficiência térmica do coletor estudado.

#### 4.1.1. CONFIGURAÇÃO I - COLETOR SEM REVESTIMENTO + RT150

Tabela 4.1. Dados horários do primeiro dia de ensaio (19/03).

<i>TEMPO</i> (Hora)	$T_{entrada}$ (°C)	$T_{saida}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$I$ (KW/m <sup>2</sup> )	$\eta_t$ (%)	$T_{amb.}$ (°C)
8:00 -9:00	31,2	40,2	9,0	0,65	24,7	30,6
9:00 -10:00	31,7	43,9	12,2	0,70	31,0	29,8
10:00 -11:00	32,3	46,6	14,4	0,73	35,0	28,6
11:00 -12:00	35,3	50,3	14,9	0,75	35,4	28,1
12:00 -13:00	39,8	50,9	11,1	0,70	28,2	28,4
13:00 -14:00	41,3	48,7	7,4	0,70	18,8	29,2
14:00 -15:00	43,0	50,4	7,4	0,65	20,2	29,8
<b>MÉDIA</b>			<b>10,9</b>	<b>0,70</b>	<b>27,6</b>	<b>29,2</b>

Tabela 4.2. Dados horários do segundo dia de ensaio (20/03).

<i>TEMPO</i> (Hora)	$T_{entrada}$ (°C)	$T_{saida}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$I$ (KW/m <sup>2</sup> )	$\eta_t$ (%)	$T_{amb.}$ (°C)
8:00 -9:00	31,9	42,3	10,4	0,66	28,1	29,8
9:00 -10:00	32,3	44,9	12,6	0,72	31,2	29,7
10:00 -11:00	34,1	48,2	14,1	0,73	34,2	30,0
11:00 -12:00	39,1	50,9	11,8	0,75	28,0	30,2
12:00 -13:00	43,3	53,3	10,0	0,75	23,7	30,7
13:00 -14:00	45,4	53,4	8,1	0,72	19,9	29,0
14:00 -15:00	46,3	49,8	3,6	0,67	9,5	28,6
<b>MÉDIA</b>			<b>10,1</b>	<b>0,71</b>	<b>24,9</b>	<b>29,7</b>



Tabela 4.3. Dados horários do terceiro dia de ensaio (21/03).

<i>TEMPO</i> (Hora)	$T_{entrada}$ (°C)	$T_{saída}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$I$ (KW/m <sup>2</sup> )	$\eta t$ (%)	$T_{amb.}$ (°C)
8:00 -9:00	30,8	40,3	9,5	0,65	26,0	28,4
9:00 -10:00	31,4	44,1	12,7	0,72	31,4	27,8
10:00 -11:00	33,2	46,4	13,2	0,73	32,1	28,4
11:00 -12:00	38,6	49,7	11,1	0,75	26,3	30,0
12:00 -13:00	42,2	51,6	9,4	0,75	22,3	30,0
13:00 -14:00	44,4	51,8	7,4	0,70	18,7	29,4
14:00 -15:00	46,4	50,5	4,1	0,65	11,3	26,7
<b>MÉDIA</b>			<b>9,6</b>	<b>0,71</b>	<b>24,0</b>	<b>28,7</b>

Tabela 4.4. Dados horários do quarto dia de ensaio (07/04).

<i>TEMPO</i> (Hora)	$T_{entrada}$ (°C)	$T_{saída}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$I$ (KW/m <sup>2</sup> )	$\eta t$ (%)	$T_{amb.}$ (°C)
8:00 -9:00	28,2	40,4	12,1	0,60	35,9	28,4
9:00 -10:00	28,7	43,3	14,7	0,70	37,2	27,8
10:00 -11:00	32,3	46,7	14,4	0,72	35,6	28,4
11:00 -12:00	38,9	51,1	12,2	0,72	30,1	30,0
12:00 -13:00	42,0	53,4	11,4	0,72	28,2	30,0
13:00 -14:00	43,7	54,1	10,4	0,70	26,5	29,4
14:00 -15:00	44,7	51,1	6,4	0,60	19,1	26,7
<b>MÉDIA</b>			<b>11,7</b>	<b>0,68</b>	<b>30,4</b>	<b>28,7</b>

A Tabela 4.5 mostra os resultados médios gerais obtidos para os quatro dias de ensaios para a configuração I.

**Tabela 4.5. Resultados médios gerais  
– sem revestimento + RT150.**

<b><i>DIAS DE ENSAIO</i></b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>	<b>I (KW/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\eta_t</math> (%)</b>
<b><i>DIA 1</i></b>	<b><i>10,9</i></b>	<b><i>0,70</i></b>	<b><i>27,6</i></b>
<b><i>DIA 2</i></b>	<b><i>10,1</i></b>	<b><i>0,71</i></b>	<b><i>24,9</i></b>
<b><i>DIA 3</i></b>	<b><i>9,6</i></b>	<b><i>0,71</i></b>	<b><i>24,0</i></b>
<b><i>DIA 4</i></b>	<b><i>11,7</i></b>	<b><i>0,68</i></b>	<b><i>30,4</i></b>
<b><i>MÉDIA</i></b>	<b><i>10,6</i></b>	<b><i>0,70</i></b>	<b><i>26,7</i></b>

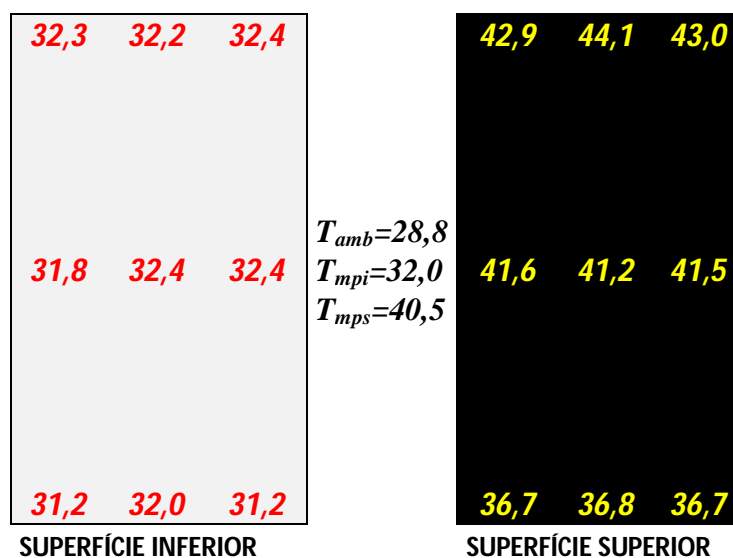
Os dados das tabelas mostram que a temperatura de saída do coletor sempre esteve acima dos 40°C, sendo a maior média horária registrada de 54,1 °C. A temperatura de entrada no coletor, no início dos testes, sempre esteve, praticamente igual à temperatura ambiente.

O sistema foi capaz de propiciar água quente no final do dia, com temperatura em média de 8° à 12° C acima da temperatura considerada ideal para o banho, que é entre 34 e 36 °C, demonstrando assim ser possível em 1(um) dia funcionamento, atingir o seu objetivo, mesmo tendo uma baixa eficiência térmica em relação aos coletores alternativos disponíveis.

A eficiência média do coletor nesta configuração ficou em torno de 27%, um pouco abaixo da maioria dos coletores alternativos, com eficiência térmica em torno de 30 a 35%. Já se tinha ciência que a mesma era de significativa magnitude uma vez que o coletor não tem cobertura transparente para minimizar as trocas convectivas e radiativas com o meio ambiente e não está contido em uma caixa com isolamento no fundo e laterais.

A média da radiação solar global para todos os dias ensaiados esteve em torno de 700 W/m<sup>2</sup>, demonstrando-se a escolha correta para o ensaio comparativo entre os dias de testes. Foram escolhidos dias de baixa ou ausência de nebulosidade para a caracterização de condições solarimétricas próximas para todos os dias de ensaio.

As temperaturas das superfícies externas superior e inferior da placa absorvedora foram medidas para a avaliação da susceptibilidade à degradações térmica e por radiação ultra violeta. A Figura 4.1 mostra seus valores para a CONFIGURAÇÃO I.



**Figura 4.1. Temperaturas médias em diversos pontos na superfície da placa absorvedora.**

Os valores medidos mostram que os níveis de temperatura da placa absorvedora na superfície superior, exposta à radiação solar estiveram muito distantes do nível crítico para início da degradação térmica, em torno de 60°C. Apesar das propriedades demonstrarem a característica do PVC como isolante térmico, este trabalho demonstra que é possível usá-lo como condutor de calor, principalmente em função de seu baixo custo. Pode-se utilizá-lo como elemento absorvedor, protegendo-o das degradações inerentes a sua exposição à radiação solar e calor.

A Tabela 4.6 apresenta os níveis de temperatura da água aquecida em vários pontos do reservatório para cada dia de ensaio.

**Tabela 4.6. Níveis de temperatura média em vários pontos do reservatório térmico para cada dia de ensaio.**

<i>DIAS DE ENSAIO</i>	$T_{baixo}$ (°C)	$T_{1/4}$ (°C)	$T_{1/2}$ (°C)	$T_{3/4}$ (°C)	$T_{cima}$ (°C)
<i>DIA 1</i>	41,2	44,5	45,3	45,0	45,6
<i>DIA 2</i>	45,0	46,3	48,2	49,0	49,2
<i>DIA 3</i>	44,5	47,1	48,2	48,5	48,7
<i>DIA 4</i>	44,3	47,7	49,6	49,8	49,6
<b><i>MÉDIA</i></b>	<b>43,8</b>	<b>46,4</b>	<b>47,8</b>	<b>48,1</b>	<b>48,3</b>

No que diz respeito aos níveis de temperatura medidos em vários pontos do reservatório térmico, percebe-se que estiveram acima dos níveis médios exigidos para o banho, entre 34 e 36°C. A diferença entre o nível de temperatura mais elevado, na parte de cima do reservatório e o menor, na parte baixa, correspondeu a 10%, o que demonstra que quase toda água contida no tambor esteve perto da uniformidade pretendida.

#### 4.1.2. CONFIGURAÇÃO II - COLETOR COM REVESTIMENTO+RT150

As Tabelas a seguir apresentam os valores médios dos parâmetros medidos nos testes realizados com o sistema de aquecimento para a **Configuração II**.

**Tabela 4.7. Dados horários do primeiro dia de ensaio (24/03).**

<b>TEMPO (Hora)</b>	<b><math>T_{entrada}</math> (°C)</b>	<b><math>T_{saida}</math> (°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>	<b><math>I</math> (KW/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\eta t</math> (%)</b>	<b><math>T_{amb.}</math> (°C)</b>
8:00 -9:00	31,1	39,9	8,8	0,65	24,2	28,4
9:00 -10:00	31,3	43,0	11,7	0,70	29,8	28,3
10:00 -11:00	32,6	46,0	13,3	0,75	31,6	28,3
11:00 -12:00	37,3	48,8	11,5	0,70	29,2	29,2
12:00 -13:00	41,1	51,3	10,2	0,60	30,2	29,7
13:00 -14:00	44,3	51,2	6,9	0,55	22,4	28,6
14:00 -15:00	46,1	49,2	3,1	0,55	10,1	28,5
<b>MÉDIA</b>			<b>9,4</b>	<b>0,64</b>	<b>25,4</b>	<b>28,7</b>

**Tabela 4.8. Dados horários do segundo dia de ensaio (25/03).**

<b>TEMPO (Hora)</b>	<b><math>T_{entrada}</math> (°C)</b>	<b><math>T_{saida}</math> (°C)</b>	<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>	<b><math>I</math> (KW/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\eta t</math> (%)</b>	<b><math>T_{amb.}</math> (°C)</b>
8:00 -9:00	31,9	40,2	8,3	0,55	26,7	27,8
9:00 -10:00	32,0	43,3	11,3	0,60	33,4	28,3
10:00 -11:00	33,4	46,4	12,9	0,70	32,8	29,0
11:00 -12:00	37,7	48,6	11,0	0,72	27,1	28,8
12:00 -13:00	41,5	51,0	9,6	0,70	24,3	29,3
13:00 -14:00	44,6	51,6	7,1	0,70	17,9	30,5
14:00 -15:00	46,5	49,7	3,2	0,65	8,7	29,0
<b>MÉDIA</b>			<b>9,0</b>	<b>0,66</b>	<b>24,4</b>	<b>29,0</b>

Tabela 4.9. Dados horários do terceiro dia de ensaio (31/03).

<i>TEMPO</i> (Hora)	$T_{entrada}$ (°C)	$T_{saida}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$I$ (KW/m <sup>2</sup> )	$\eta t$ (%)	$T_{amb.}$ (°C)
8:00 -9:00	28,3	38,3	10,0	0,70	25,4	28,9
9:00 -10:00	28,7	42,2	13,5	0,72	33,2	29,1
10:00 -11:00	29,7	44,2	14,5	0,72	35,7	28,1
11:00 -12:00	35,4	47,8	12,4	0,70	31,4	28,3
12:00 -13:00	40,6	50,5	9,9	0,72	24,4	28,9
13:00 -14:00	42,9	51,2	8,3	0,72	20,5	28,8
14:00 -15:00	44,6	50,2	5,6	0,70	14,2	28,3
<b>MÉDIA</b>			<b>10,6</b>	<b>0,71</b>	<b>26,4</b>	<b>28,6</b>

Tabela 4.10. Dados horários do quarto dia de ensaio (01/04).

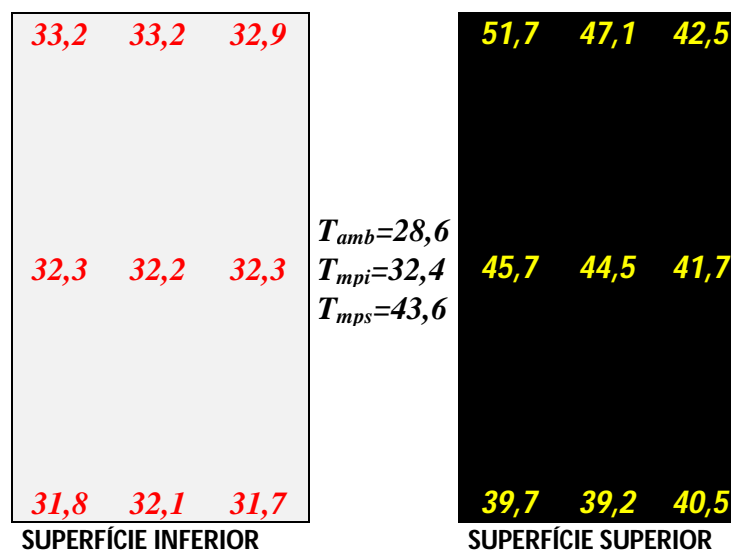
<i>TEMPO</i> (Hora)	$T_{entrada}$ (°C)	$T_{saida}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$I$ (KW/m <sup>2</sup> )	$\eta t$ (%)	$T_{amb.}$ (°C)
8:00 -9:00	29,4	40,6	11,2	0,70	28,4	26,6
9:00 -10:00	30,0	44,3	14,4	0,72	35,5	27,0
10:00 -11:00	32,4	46,9	14,5	0,72	35,7	29,1
11:00 -12:00	38,4	50,5	12,0	0,72	29,7	28,6
12:00 -13:00	41,7	52,6	10,9	0,72	26,9	28,4
13:00 -14:00	43,2	53,4	10,2	0,70	26,0	27,9
14:00 -15:00	44,2	51,1	7,0	0,65	19,0	28,4
<b>MÉDIA</b>			<b>11,5</b>	<b>0,70</b>	<b>28,7</b>	<b>28,0</b>

A Tabela 4.11 apresenta os resultados médios gerais dos testes realizados para a Configuração II.

**Tabela 4.11. Resultados médios gerais – com revestimento + RT150.**

<i>DIAS DE ENSAIO</i>	$\Delta T$ (°C)	I (KW/m <sup>2</sup> )	$\eta_t$ (%)
<i>DIA 1</i>	9,4	0,64	25,4
<i>DIA 2</i>	9,0	0,66	24,4
<i>DIA 3</i>	10,6	0,71	26,4
<i>DIA 4</i>	11,5	0,70	28,7
<b>MÉDIA</b>	<b>10,1</b>	<b>0,68</b>	<b>26,2</b>

A Figura 4.2 mostra os valores das temperaturas médias na superfície externa da placa absorvedora para a CONFIGURAÇÃO II.



**Figura 4.2. Temperaturas médias em diversos pontos na superfície da placa absorvedora.**

O valor da temperatura média de placa para essa configuração 43,6°C foi 8,7% superior ao obtido para a Configuração sem revestimento, o que demonstra que a colocação das latas na placa absorvedora proporcionou o efeito esperado e desejado.

Os dados das tabelas mostram que a temperatura de saída do coletor sempre esteve acima dos 39°C, sendo a maior média horária registrada de 53,4 °C. A temperatura de entrada no coletor (reservatório), no início dos testes, para o terceiro dia, foi praticamente igual à temperatura ambiente, mas para o primeiro, segundo e quarto dia, a temperatura de entrada esteve acima da temperatura ambiente, em média, 11%.

O sistema foi capaz de propiciar água quente no final do dia, com temperatura em média de 11° à 12° C acima da temperatura considerada ideal para o banho, entre 34 °C e 36 °C, demonstrando assim ser possível em 1 (um) dia funcionamento, atingir o seu objetivo, mesmo tendo uma baixa eficiência térmica em relação aos coletores convencionais.

A eficiência média do coletor nesta configuração ficou em torno de 26%, um pouco abaixo da maioria dos coletores alternativos, com eficiência térmica em torno de 30 a 35% motivo já justificado anteriormente.

A média da radiação solar global para todos os dias ensaiados esteve em torno de 700 W/m<sup>2</sup>. Foram escolhidos dias de baixa ou ausência de nebulosidade para a caracterização de condições solarimétricas próximas para todos os dias de ensaio.

A Tabela 4.12 apresenta os níveis de temperatura da água aquecida em vários pontos do reservatório para cada dia de ensaio.

**Tabela 4.12. Níveis de temperatura média em vários pontos do reservatório térmico para cada dia de ensaio.**

<b><i>DIAS DE ENSAIO</i></b>	<b><i>T<sub>baixo</sub></i></b> <b><i>(°C)</i></b>	<b><i>T<sub>1/4</sub></i></b> <b><i>(°C)</i></b>	<b><i>T<sub>1/2</sub></i></b> <b><i>(°C)</i></b>	<b><i>T<sub>3/4</sub></i></b> <b><i>(°C)</i></b>	<b><i>T<sub>cima</sub></i></b> <b><i>(°C)</i></b>
<b><i>DIA 1</i></b>	<b><i>45,9</i></b>	<b><i>46,8</i></b>	<b><i>48,0</i></b>	<b><i>48,1</i></b>	<b><i>48,1</i></b>
<b><i>DIA 2</i></b>	<b><i>46,3</i></b>	<b><i>47,6</i></b>	<b><i>48,6</i></b>	<b><i>48,8</i></b>	<b><i>48,8</i></b>
<b><i>DIA 3</i></b>	<b><i>42,9</i></b>	<b><i>46,9</i></b>	<b><i>48,1</i></b>	<b><i>48,2</i></b>	<b><i>48,4</i></b>
<b><i>DIA 4</i></b>	<b><i>43,9</i></b>	<b><i>46,6</i></b>	<b><i>48,5</i></b>	<b><i>48,3</i></b>	<b><i>48,3</i></b>
<b><i>MÉDIA</i></b>	<b><i>44,8</i></b>	<b><i>47,0</i></b>	<b><i>48,3</i></b>	<b><i>48,4</i></b>	<b><i>48,4</i></b>

No que diz respeito aos níveis de temperaturas medidas em vários pontos do reservatório térmico, percebe-se que estiveram acima dos níveis médios exigidos para o banho, entre 34 e 36°C. A diferença entre o nível de temperatura mais elevado, na parte de cima do reservatório e o menor, na parte de baixa, correspondeu a 8,0%, o que demonstra que quase toda água contida no tambor esteve perto da uniformidade pretendida.

Os resultados obtidos para as duas configurações estiveram muito próximos, o que se faz optar pela Configuração I pela maior facilidade de construção e montagem do coletor estudado.

Para avaliar o sistema na sua condição real de funcionamento, procedeu-se a simulação de banhos através da retirada de certo volume de água quente nos seguintes horários: 7:00 h, 12:00 h e 18:00 h. Para isso, utilizava-se um registro colocado a  $\frac{3}{4}$  do reservatório a partir da base, retirava-se 40 litros de água e em seguida colocava-se a mesma quantidade de água fria no reservatório. A Tabela 4.13 mostra os dados medidos durante os testes de simulação de banho.

**Tabela 4.13. Dados da simulação de banhos (Com revestimento + RT150)**

<i>DIA</i>	<i>HORÁRIO (Horas)</i>	<i>T</i> <sub>água retirada (°C)</sub>	<i>T</i> <sub>água colocada (°C)</sub>	<i>T</i> <sub>água após subst. (°C)</sub>	<i>T</i> <sub>ambiente (°C)</sub>
1/abr	18:00	45,0	28,8	41,1	27,5
2/abr	07:00	<b>36,5</b>	28,2	33,5	27,0
2/abr	12:00	49,6	30,1	38,2	28,7
2/abr	18:00	43,3	29,9	40,0	28,3
3/abr	07:00	<b>35,2</b>	28,2	33,3	27,2
3/abr	12:00	46,9	31,3	42,0	27,7
3/abr	18:00	40,7	29,5	37,5	27,3
4/abr	07:00	<b>33,5</b>	29,6	32,5	28,0

Os dados da tabela 4.13 mostram que com exceção do dia 04/abril que teve uma temperatura de 33,5 °C às 7:00 h, todos os outros dias e horários os níveis de temperatura da água retirada estavam agradáveis para o banho apresentando, assim, autonomia para 3 (três) dias. Esses resultados mostraram-se importantes principalmente em função do baixo custo do sistema de aquecimento estudado.



### 4.1.3. CONFIGURAÇÃO III - COLETOR SEM REVESTIMENTO+RT200

As Tabelas a seguir mostram os resultados médios gerais obtidos para a Configuração escolhida, para um maior volume do reservatório térmico, buscando-se um aumento do volume de água aquecida para o banho.

Tabela 4.14. Dados horários do primeiro dia de ensaio (15/04).

<i>TEMPO</i> (Hora)	$T_{entrada}$ (°C)	$T_{saida}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$I$ (KW/m <sup>2</sup> )	$\eta t$ (%)	$T_{amb.}$ (°C)
8:00 -9:00	27,7	38,6	10,9	0,55	47,0	26,8
9:00 -10:00	27,9	41,7	13,8	0,72	45,3	28,1
10:00 -11:00	28,7	43,8	15,1	0,72	49,7	28,5
11:00 -12:00	31,0	45,7	14,7	0,72	48,3	28,3
12:00 -13:00	35,3	47,2	11,9	0,70	40,4	28,5
13:00 -14:00	38,1	49,0	10,9	0,70	36,8	28,7
14:00 -15:00	39,6	47,4	7,8	0,65	28,4	29,1
<b>MÉDIA</b>			<b>12,1</b>	<b>0,68</b>	<b>42,3</b>	<b>28,3</b>

Tabela 4.15. Dados horários do segundo dia de ensaio (16/04).

<i>TEMPO</i> (Hora)	$T_{entrada}$ (°C)	$T_{saida}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$I$ (KW/m <sup>2</sup> )	$\eta t$ (%)	$T_{amb.}$ (°C)
8:00 -9:00	30,0	39,9	9,9	0,60	39,1	27,0
9:00 -10:00	30,4	44,5	14,1	0,72	46,4	26,7
10:00 -11:00	31,3	45,7	14,4	0,75	45,6	27,5
11:00 -12:00	31,5	46,1	14,6	0,75	46,0	28,3
12:00 -13:00	34,0	46,8	12,8	0,75	40,3	28,6
13:00 -14:00	39,1	45,9	6,8	0,72	22,3	27,4
14:00 -15:00	42,6	45,3	2,7	0,70	9,3	27,0
<b>MÉDIA</b>			<b>10,8</b>	<b>0,71</b>	<b>35,6</b>	<b>27,5</b>

Tabela 4.16. Dados do terceiro dia de ensaio (17/04).

<i>TEMPO</i> (Hora)	$T_{entrada}$ (°C)	$T_{saida}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$I$ (KW/m <sup>2</sup> )	$\eta t$ (%)	$T_{amb.}$ (°C)
8:00 -9:00	29,3	39,6	10,3	0,65	37,4	26,7
9:00 -10:00	29,3	44,9	15,6	0,72	51,3	26,7
10:00 -11:00	29,9	46,4	16,6	0,72	54,5	27,3
11:00 -12:00	31,0	47,6	16,5	0,72	54,4	29,5
12:00 -13:00	33,4	48,0	14,7	0,72	48,3	27,5
13:00 -14:00	38,1	48,0	9,9	0,72	32,6	27,5
14:00 -15:00	41,7	46,9	5,2	0,70	17,6	27,1
<b>MÉDIA</b>			<b>12,7</b>	<b>0,71</b>	<b>42,3</b>	<b>27,5</b>

Tabela 4.17. Dados do quarto dia de ensaio (20/05).

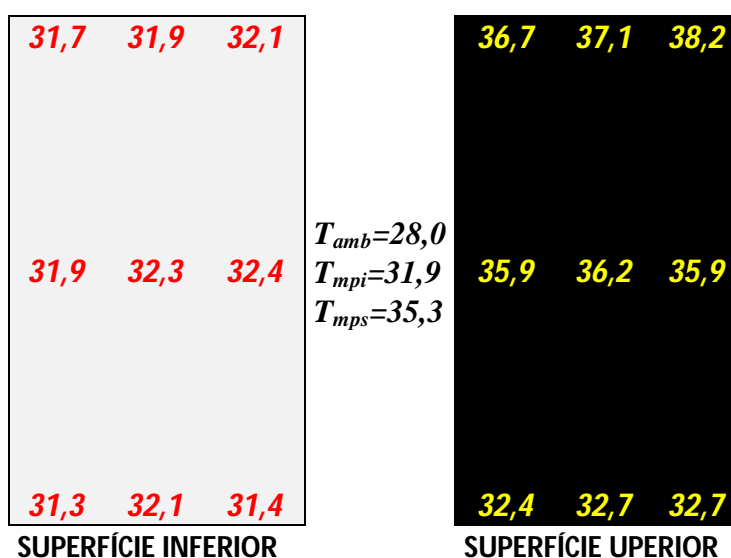
<i>TEMPO</i> (Hora)	$T_{entrada}$ (°C)	$T_{saida}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$I$ (KW/m <sup>2</sup> )	$\eta t$ (%)	$T_{amb.}$ (°C)
8:00 -9:00	28,1	39,0	10,9	0,65	39,7	28,7
9:00 -10:00	28,2	41,2	13,0	0,70	44,0	29,3
10:00 -11:00	28,7	41,8	13,1	0,65	47,8	29,0
11:00 -12:00	29,1	43,1	14,0	0,65	51,0	29,1
12:00 -13:00	30,5	45,7	15,2	0,72	50,1	28,8
13:00 -14:00	34,4	45,2	10,8	0,65	39,4	27,8
14:00 -15:00	37,5	43,8	6,3	0,60	24,7	27,3
<b>MÉDIA</b>			<b>11,9</b>	<b>0,66</b>	<b>42,4</b>	<b>28,6</b>

A Tabela 4.18 apresenta os resultados médios gerais dos testes realizados para a Configuração III.

**Tabela 4.18. Resultados médios gerais – sem revestimento + RT200.**

<i>DIAS DE ENSAIO</i>	$\Delta T$ (°C)	I (KW/m <sup>2</sup> )	$\eta_t$ (%)
<i>DIA 1</i>	12,1	0,68	42,3
<i>DIA 2</i>	10,8	0,71	35,6
<i>DIA 3</i>	12,7	0,71	42,3
<i>DIA 4</i>	11,9	0,66	42,4
<b><i>MÉDIA</i></b>	<b>11,9</b>	<b>0,69</b>	<b>40,6</b>

Os resultados demonstram uma maior eficiência para um maior volume do reservatório térmico, em função da maior vazão circulante, e de uma menor perda térmica que pode ser observada pelos resultados apresentados na Figura 4.3.



**Figura 4.3. Temperaturas médias em diversos pontos na superfície da placa absorvedora.**

Os valores de temperatura da superfície externa superior da placa absorvedora são inferiores aos obtidos para as configurações anteriormente avaliadas, demonstrando uma maior transferência do calor gerado para água que nela circula.

A Tabela 4.19 apresenta os níveis de temperatura da água aquecida em vários pontos do reservatório para cada dia de ensaio.

**Tabela 4.19. Níveis de temperatura média em vários pontos do reservatório térmico para cada dia de ensaio.**

<i><b>DIAS DE ENSAIO</b></i>	<b>T<sub>baixo</sub></b> (°C)	<b>T<sub>1/4</sub></b> (°C)	<b>T<sub>1/2</sub></b> (°C)	<b>T<sub>3/4</sub></b> (°C)	<b>T<sub>cima</sub></b> (°C)
<i><b>DIA 1</b></i>	39,8	42,5	44,2	45,0	45,2
<i><b>DIA 2</b></i>	41,2	43,0	43,6	43,9	43,8
<i><b>DIA 3</b></i>	41,2	43,3	43,9	44,1	44,5
<i><b>DIA 4</b></i>	37,4	40,2	42,1	42,8	42,6
<i><b>MÉDIA</b></i>	<b>39,9</b>	<b>42,2</b>	<b>43,5</b>	<b>43,9</b>	<b>44,0</b>

No que diz respeito aos níveis de temperatura medidos em vários pontos do reservatório térmico, percebe-se que estiveram acima dos níveis médios exigidos para o banho, entre 34 e 36°C. A diferença entre o nível de temperatura mais elevado, na parte de cima do reservatório e o menor, na parte de baixa, correspondeu a 10%, o que demonstra que quase toda água contida no tambor esteve perto da uniformidade pretendida.

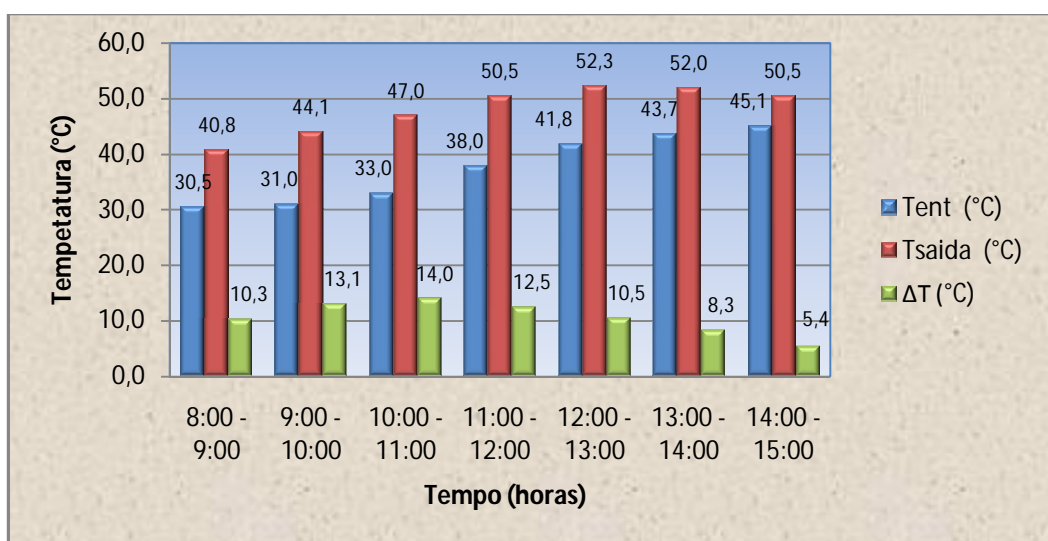
A Tabela 4.20 apresenta os resultados médios gerais para as três configurações estudadas.

**Tabela 4.20. Resultados médios gerais para os dias de ensaio de cada configuração estudada.**

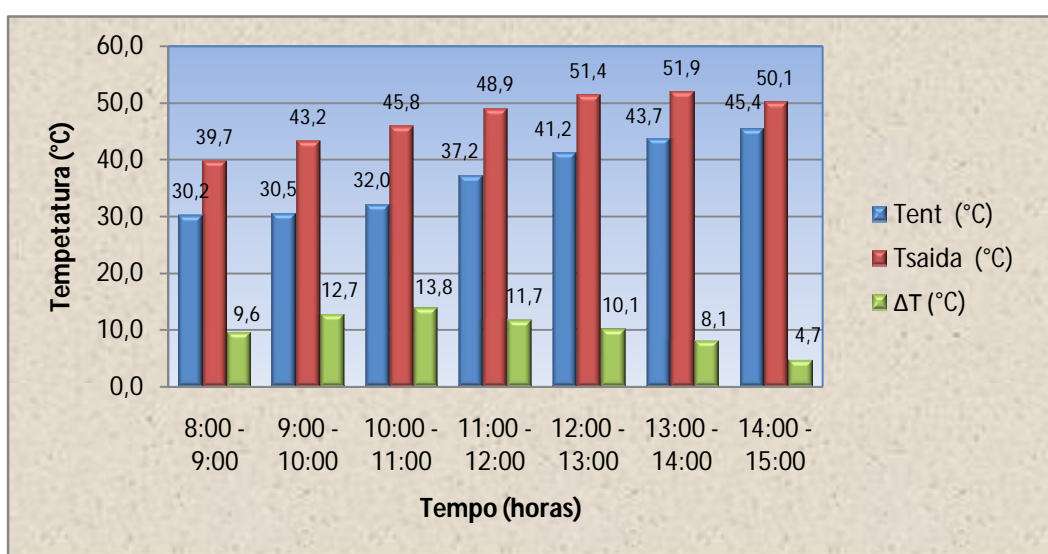
<i><b>CONFIGURAÇÃO</b></i>	<b>ΔT</b> (°C)	<b>I</b> (KW/m <sup>2</sup> )	<b>η<sub>t</sub></b> (%)
<i><b>SEM REVESTIMENTO+RT150</b></i>	<b>10,6</b>	<b>0,70</b>	<b>26,7</b>
<i><b>COM REVESTIMENTO+RT150</b></i>	<b>10,1</b>	<b>0,68</b>	<b>26,2</b>
<i><b>SEM REVESTIMENTO + RT200</b></i>	<b>11,9</b>	<b>0,69</b>	<b>40,0</b>

A configuração que apresentou um melhor desempenho foi a III embora os níveis de temperatura alcançados no reservatório térmico sejam inferiores as outras duas configurações. Analisando-se pelo objetivo maior que é a obtenção de água quente destinada a banho, percebe-se que apesar dos níveis inferiores a Configuração III apresenta a grande vantagem de proporcionar um volume 33,3% maior.

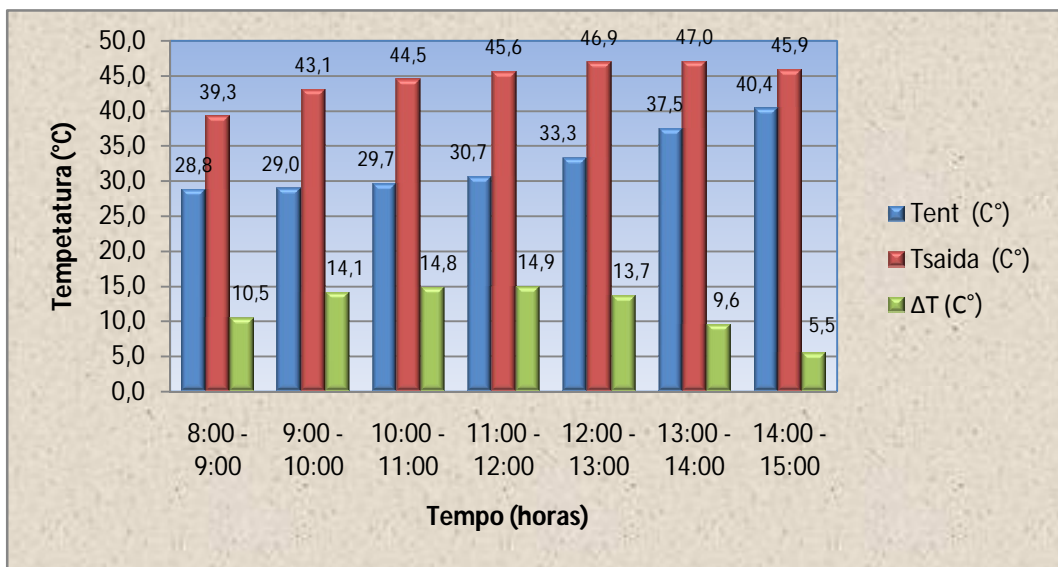
As Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 mostram os perfis das temperaturas médias horárias de entrada e saída das configurações I, II e III, respectivamente.



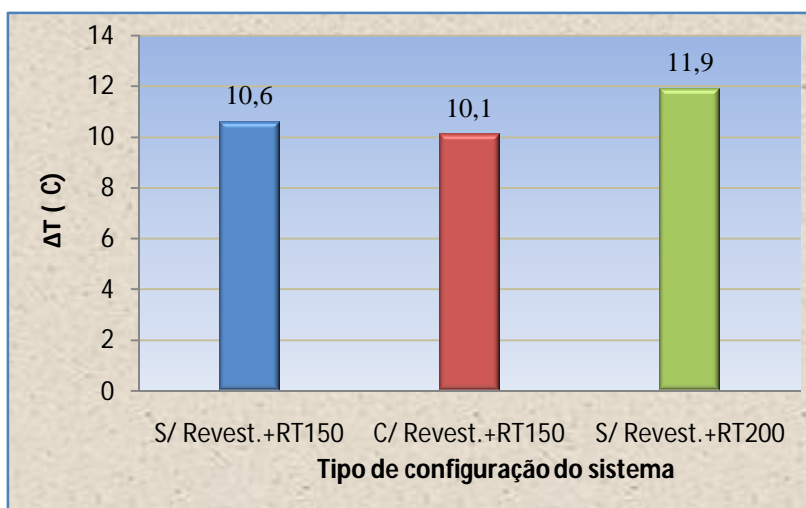
**Figura 4.4. Comportamento das temperaturas médias horárias de entrada e saída do coletor - CONFIGURAÇÃO I.**



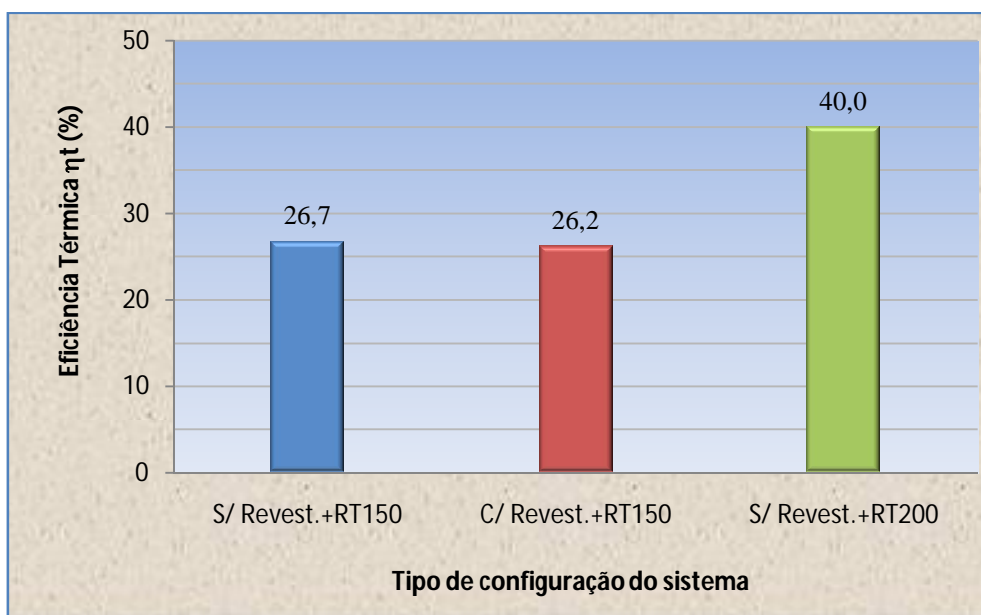
**Figura 4.5. Comportamento das temperaturas médias horárias de entrada e saída do coletor - CONFIGURAÇÃO II.**



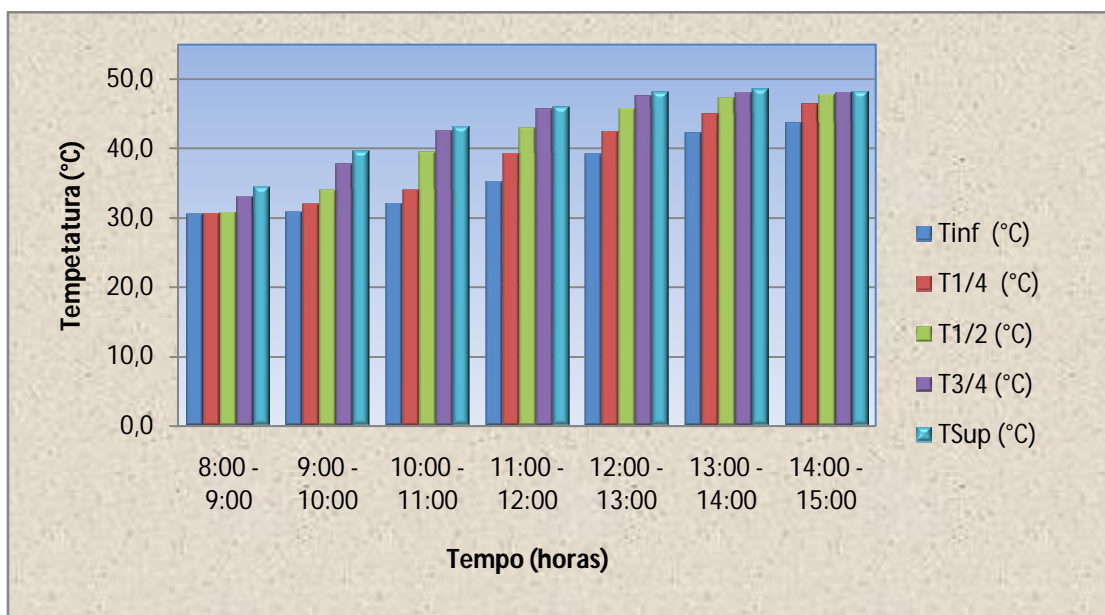
**Figura 4.6. Comportamento das temperaturas médias horárias de entrada e saída do coletor - CONFIGURAÇÃO III.**



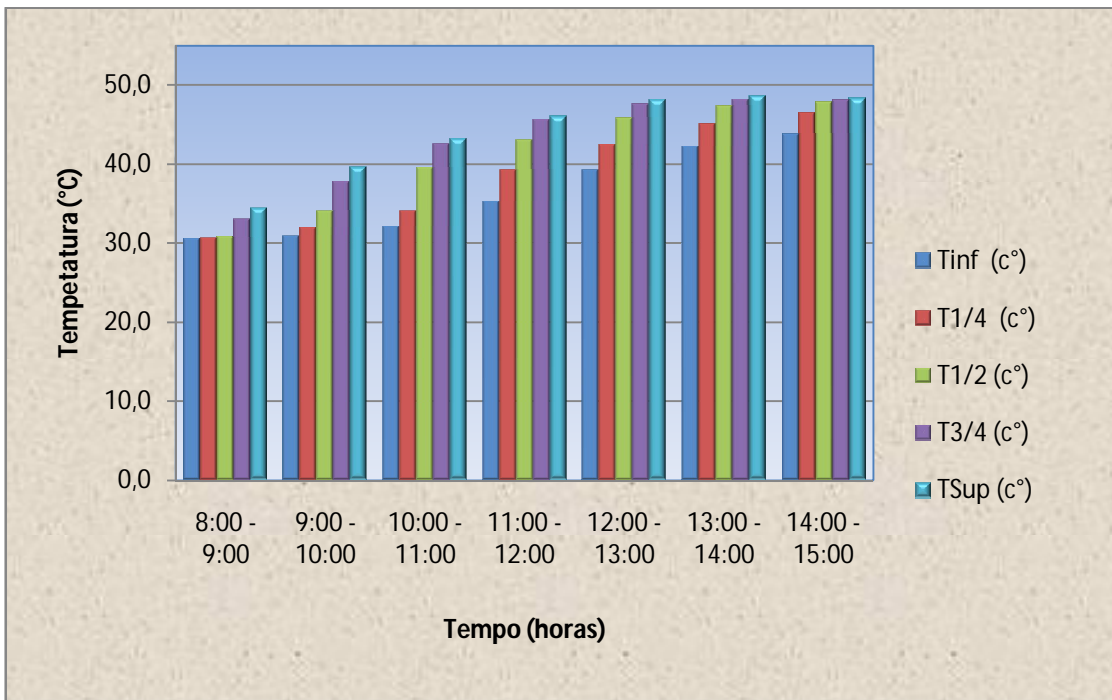
**Figura 4.7. Comparação da variação de temperatura média (ΔT) para as três configurações ensaiadas.**



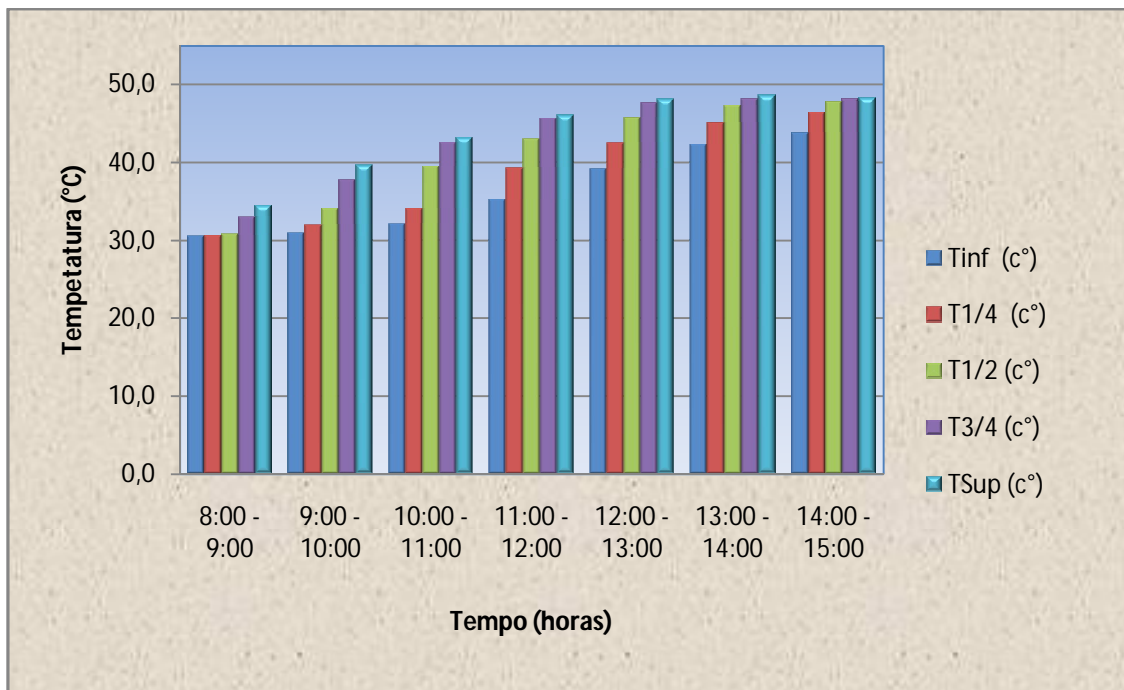
**Figura 4.8. Comparação da Eficiência Térmica ( $\eta_t$ ) para as três configurações ensaiadas.**



**Figura 4.9. Comparação entre as temperaturas médias horárias no interior do reservatório térmico - Configuração I.**



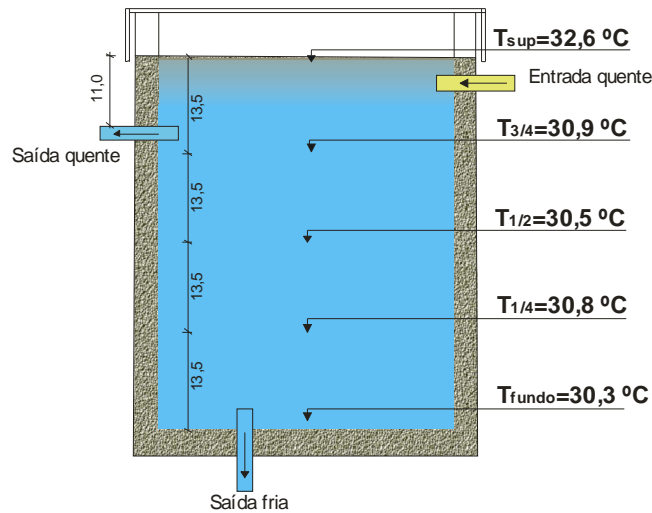
**Figura 4.10. Comparação entre as temperaturas médias horárias no interior do reservatório térmico - Configuração II.**



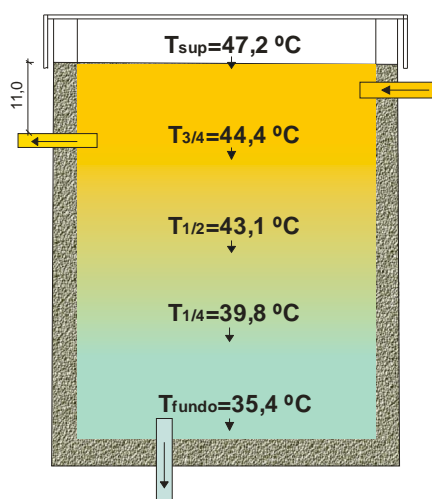
**Figura 4.11. Comparação entre as temperaturas médias horárias no interior do reservatório térmico - Configuração III.**



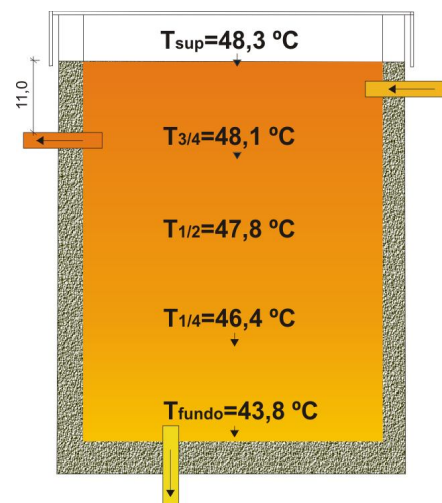
As figuras 4.12 a 4.14, 4.15 a 4.17 e 4.18 a 4.20 mostram os níveis de temperatura média do fluido, nos pontos onde foram obtidas no interior do reservatório térmico, para as três configurações estudadas I, II e III, nos seguintes horários: 8:00, 11:30 e 15:00 horas, correspondente ao início, meio e fim do ensaio, respectivamente.



**FIGURA 4.12. Média dos níveis de temperatura no interior do reservatório às 8:00 horas.**



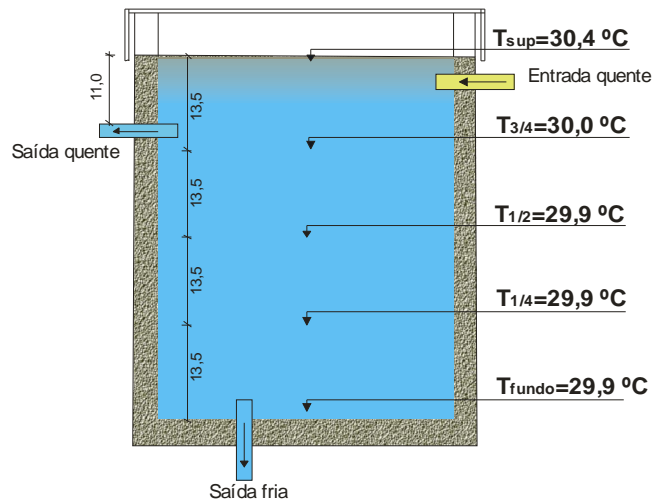
**FIGURA 4.13. Média dos níveis de temperatura no interior do reservatório às 11:30 horas.**



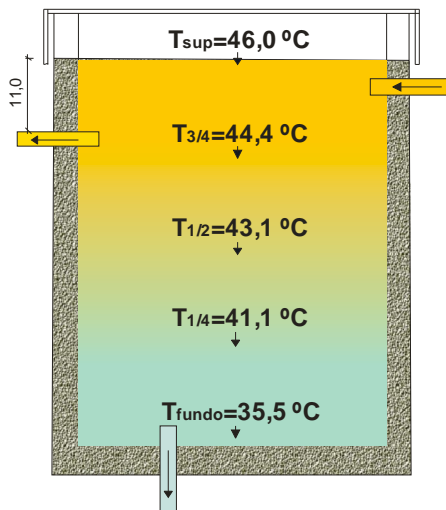
**FIGURA 4.14. Média dos níveis de temperatura no interior do reservatório às 15:00 horas.**

A Figura 4.13 mostra que às 11:30 h foi possível obter aproximadamente 35 litros de água quente com temperaturas que estava entre 43 e 47 °C. A Figura 4.14 mostra que às

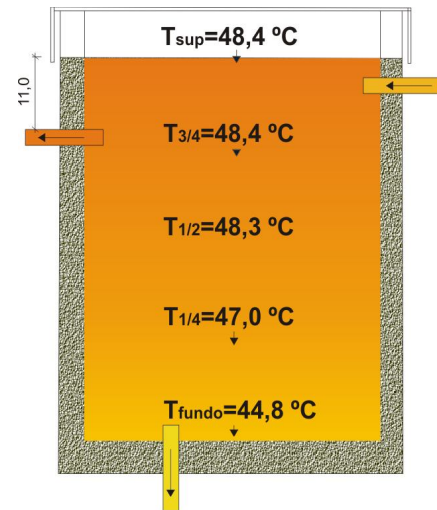
15:00h, a temperatura do fluido já começa a se uniformizar, podendo fornecer água à uma temperatura de 48,0°C.



**FIGURA 4.15. Média dos níveis de temperatura no interior do reservatório às 8:00 horas.**

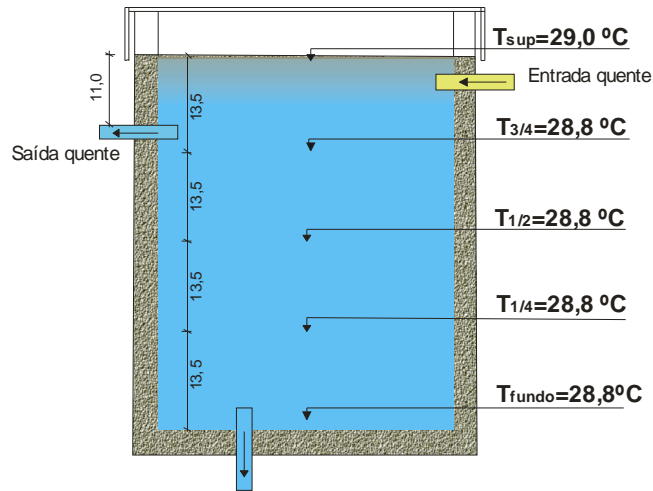


**FIGURA 4.16. Média dos níveis de temperatura no interior do reservatório às 11:30 horas.**

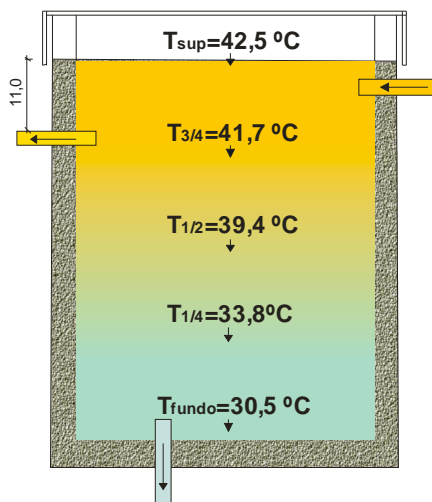


**FIGURA 4.17 Média dos níveis de temperatura no interior do reservatório às 15:00 horas.**

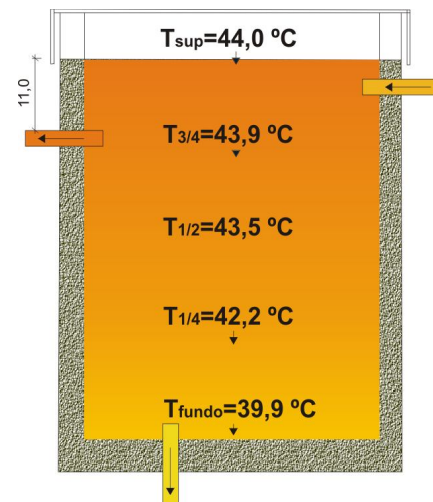
A Figura 4.16 mostra que às 11:30 h foi possível obter aproximadamente 35 litros de água quente com temperaturas que estava entre 43 e 46 °C. Já a Figura 4.17 mostra que às 15:00 h, a temperatura do fluido já começa a se uniformizar, podendo fornecer água também, à uma temperatura de 48,0 °C.



**FIGURA 4.18.** Média dos níveis de temperatura no interior do reservatório às 8:00 horas.



**FIGURA 4.19.** Média dos níveis de temperatura no interior do reservatório às 11:30 horas.



**FIGURA 4.20** Média dos níveis de temperatura no interior do reservatório às 15:00 horas.

Já a figura 4.19 mostra que às 11:30 h foi possível obter aproximadamente 35 litros de água quente com temperaturas que estava entre 39 e 42 °C. A Figura 4.20 mostra que às 15:00h, a temperatura do fluido já começa a se uniformizar, podendo fornecer água à uma temperatura de 44 °C.

Um problema encontrado para a fabricação do coletor foi conceder-lhe estanqueidade. Foram estudadas algumas opções para o acoplamento entre os tubulões e as placas de PVC, que precisam ainda serem otimizadas.

## 4.2. Determinação da perda térmica para cada configuração.

Foi utilizado o método da potência perdida, que foi calculado seguindo-se o procedimento abaixo descrito, a partir dos parâmetros térmicos medidos durante os testes realizados.

Foram determinadas as potências absorvida e transmitida pelo coletor ao fluido de trabalho e através desses dois parâmetros calculou-se a potência perdida pelo coletor, e em seguida o coeficiente global de perda térmica.

### CONFIGURAÇÃO I

$$P_{abs} = \alpha_p \cdot A \cdot I = 0,8 \cdot 1,4 \cdot 750 = 840 \text{ W}$$

$$P_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = 24,9 \cdot 14,9 = 371,01 \text{ W}$$

$$P_p = P_{abs} - P_u = 840,0 - 371,01 = 469,0 \text{ W}$$

$$U_{perdas} = \frac{P_p}{A \cdot (T_{mp} - T_a)} = \frac{469,0}{1,4 \cdot (313,5 - 301,8)} = 28,6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

### CONFIGURAÇÃO II

$$P_{abs} = 0,8 \cdot 1,4 \cdot 750 = 840 \text{ W}$$

$$P_u = 24,9 \cdot 14,5 = 361,05 \text{ W}$$

$$P_p = 840,0 - 361,05 = 478,9 \text{ W}$$

$$U_{perdas} = \frac{478,9}{1,4 \cdot (316,6 - 301,6)} = 22,8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

### CONFIGURAÇÃO III

$$P_{abs} = 0,8 \cdot 1,4 \cdot 750 = 840 \text{ W}$$

$$P_u = 33,17 \cdot 16,6 = 550,62 \text{ W}$$

$$P_p = 840,0 - 550,62 = 289,4 \text{ W}$$

$$U_{perdas} = \frac{289,4}{1,4 \cdot (308,3 - 301,0)} = 28,3 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Percebe-se que o coeficiente global de perda térmica é muito superior para o coletor em estudo, principalmente em relação aos coletores convencionais de mercado, com  $U_{perdas}$  entre 6,0 e 12,0 W/m<sup>2</sup>.K, o que já era esperado, uma vez que o mesmo não possui cobertura transparente e foi utilizado um isolante térmico com apenas 20 mm de espessura.

### 4.3. Perda térmica do reservatório térmico alternativo

Os resultados do teste para avaliar a eficiência térmica do reservatório térmico alternativo encontram-se apresentados na tabela 4.21.

**Tabela 4.21. Resultados do teste realizado com o reservatório térmico alternativo proposto.**

<b>TEMPO (HORA)</b>	<b>T<sub>água</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>ambiente</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>reserv.</sub> Cima (°C)</b>	<b>T<sub>reserv.</sub> Meio (°C)</b>	<b>T<sub>reserv.</sub> Baixo (°C)</b>
<b>16:00</b>	<b>45,3</b>	<b>27,0</b>	<b>28,0</b>	<b>28,3</b>	<b>28,5</b>
18:00	45,0	26,0	27,0	27,5	28
20:00	44,2	25,5	25,1	25,6	26,2
22:00	43,5	25,0	25,1	25,6	25,6
00:00	42,9	25,0	25,1	25,2	25,6
02:00	42,5	24,9	24,9	25,5	25,6
04:00	41,8	25,0	25,0	25,4	25,5
06:00	40,9	27,7	28,0	30,4	28,7
<b>07:00</b>	<b>40,6</b>	<b>28,4</b>	<b>28,8</b>	<b>29,6</b>	<b>28,4</b>
09:00	40,1	31,8	36,0	36,8	32,3
11:00	40,1	31,9	38,5	35,5	33,7
13:00	40,1	32,0	38,0	36,0	34,5
15:00	40,8	31,4	37,0	35,0	34,0
<b>16:00</b>	<b>40,7</b>	<b>30,0</b>	<b>35,0</b>	<b>33,0</b>	<b>32,0</b>

Os dados mostrados demonstram a boa eficiência térmica do reservatório térmico alternativo proposto. Houve uma queda de temperatura, durante as 24 horas, correspondente a 4,7°C Essa queda de temperatura está um dentro da média apontada pela literatura para reservatórios térmicos convencionais, de cobre ou inox, que apresentam valores em torno de 5°C para o nível de temperatura testado. Ressalta-se, ainda, o preço do reservatório alternativo proposto, muito menor que os reservatórios convencionais.

Percebe-se que a temperatura da superfície externa do reservatório esteve bem próxima da temperatura ambiente durante toda a noite refletindo uma baixa perda térmica pela lateral do reservatório. A temperatura do reservatório só alcançou valores bem acima da temperatura ambiente para o período em que a o reservatório passou a ser aquecido pela radiação solar global absorvida pelo mesmo, uma vez que foi pintado com tinta preto fosco. Portanto, a perda mais significativa ocorreu pela parte inferior e/ou tampa do reservatório.

No que diz respeito à resistência mecânica do reservatório alternativo proposto não se verificou danos à sua estrutura, demonstrando suportar o peso correspondente ao volume de água contido no reservatório. Não houve também ocorrência de vazamentos, o que atesta sua boa vedação, obtida através de resina isoftálica.

Para a construção do coletor estudado os principais materiais utilizados foram: placa alveolar de forro de PVC; latas de cervejas e refrigerantes; tubos de PVC de 1", 1½" e ½", joelhos de ½" e cola PVC. O custo de fabricação do coletor ficou em R\$ 75,00/m<sup>2</sup> e encontra-se discriminado na tabela 4.22.

**Tabela 4.22. Custo dos materiais utilizados na montagem do coletor.**

<b>MATERIAL</b>	<b>UNID.</b>	<b>QUANT.</b>	<b>CUSTO UNIT. R\$)</b>	<b>CUSTO TOTAL(R\$)</b>
Forro de PVC	m <sup>2</sup>	1,4	14,00	19,6
Tubo de PVC Ø40mm	M	2,1	8,00	16,8
Tubo de PVC Ø32mm	M	2,3	6,00	13,8
Tubo de PVC Ø20mm	M	4,2	1,50	5,04
Conexões e registros	unid.	15	-	19,00
Resina isoftálica	Kg	0,5	17,00	8,50
Esmalte preto fosco	Kg	1,0	15,00	15,00
Adesivo plástico	unid.	1,0	5,00	5,00
Isolante térmico (EPS)	unid.	3,0	5,00	15,00
<b><i>TOTAL</i></b>				<b><i>103,98</i></b>

O custo de fabricação de cada reservatório térmico construído ficou em torno de R\$ 200,00 (Santos, 2008).

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com base nos objetivos definidos serão apresentadas as conclusões a seguir, bem como algumas sugestões para possíveis trabalhos futuros, de modo a torná-los mais eficientes e competitivos com demais tipos de coletores.

### 5.1. CONCLUSÕES

1. O sistema solar de aquecimento demonstrou-se viável para o aquecimento residencial de água destinada ao banho, para uma família com quatro pessoas, devendo ter o banheiro dupla tubulação, uma para água fria e outra para água quente. Os fluidos podem ser misturados com o objetivo de obter-se a água na temperatura ideal de banho.

2. O sistema mostrou-se de fácil fabricação e montagem, apresentando baixo peso e facilidade no manuseio do coletor;

3. A configuração sem revestimento (I e III) apresenta maior viabilidade de utilização pela simplicidade de fabricação e montagem do coletor. A configuração III com volume do reservatório térmico de 200 litros apresentou-se mais eficiente em função de uma maior vazão circulante no interior do coletor;

4. O sistema de aquecimento testado apresenta baixa relação custo benefício, podendo contribuir sensivelmente para a socialização do uso da água aquecida para banho através da energia solar;

5. Os reservatórios térmicos alternativos mostraram-se viáveis para serem utilizados em sistemas de aquecimento, por apresentarem um nível de perda térmica próximo aos reservatórios convencionais e um baixo custo. A temperatura no fundo do tambor esteve próxima da temperatura do nível superior, o que demonstra a significativa taxa de aquecimento proporcionada pelo sistema de aquecimento alternativo proposto;

6. A temperatura da placa absorvedora de PVC esteve abaixo do nível crítico para início do processo de degradação térmica. No que diz respeito à degradação por UV tal efeito é



amenizado pela tinta preto fosco que recobre os tubos absorvedores, que contém pigmentos pretos absorvedores de radiação ultravioleta;

7. A perda térmica do coletor estudado é superior a relativa aos coletores convencionais, e até mesmo em relação a outros coletores alternativos, porém ressalte-se que o coletor proposto não apresenta cobertura transparente que diminui significativamente as trocas térmicas entre o coletor e o ambiente;

8. O isolante térmico colocado na superfície inferior da placa absorvedora mostrou-se eficiente, mas é preciso estudar uma maneira de não deixá-lo exposto ao ambiente para minimizar seu processo degradativo sem alterar as características básicas do coletor, baixo custo e fáceis processos de fabricação e montagem;

9. O sistema de aquecimento apresentou uma significativa autonomia, podendo ser aumentada com a construção de um coletor de maior área ou mesmo com a utilização de outro coletor em série.

## **5.2 SUGESTÕES**

1. É imprescindível que se instale o sistema em um banheiro, com bóia de alimentação do reservatório térmico e ligação do coletor ao ponto de banho, para estudar o sistema de forma mais acurada. Faz-se necessário também a introdução de alguns acessórios (registros, bóias, válvulas de retenção) para uma melhor operacionalidade do sistema;

2. É necessário se fazer testes por um período mais longo para verificar a sua durabilidade e resistência às intempéries e assim confirmar sua competitividade com coletores disponíveis no mercado;

3. É possível, estudar também, a ligação em paralelo para uma melhor taxa de aquecimento, sem aumentar significativamente o custo do sistema, uma vez que o custo das placas é baixo.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEZERRA, A.M., *Aplicações térmicas da energia solar*, Editora Universitária - UFPb, João Pessoa, 2001.
- BEZERRA, J.M., *Análise de um Sistema Alternativo para Aquecimento de água por Energia Solar*, 1999. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- BLISS, R.W., *The derivations of several plate efficiency factors useful in the design of flat plate solar heat collectors*, *Solar Energy*, 3, 55, 1959.
- CEMPRE (**COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM**) e ABIPET (*Associação Brasileira dos Fabricantes de Embalagens de PET*), *Manual Reciclagem & Negócios – PET, Enfardamento e revalorização de sucatas de PET*, 1997, São Paulo - SP .
- CENSOLAR, *La Energía Solar: Aplicaciones Prácticas*, Tercera edición, Sevilla, 1999.
- COBEM 2005 – Congresso Internacional de Engenharia Mecânica, Ouro Preto – 2005.
- COMETA, E., *Energia solar: utilização e empregos práticos*, Editora Hemus, 127 p., São Paulo, 1978.
- COSTA, R.N.A., **viabilidades térmica, econômica e de materiais de um sistema solar de aquecimento de água a baixo custo para fins residenciais**, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, UFRN, 2007.
- CRISTOFARI, C. Et al., *Modeling and performance of a copolymer solar water heating collector*, *Solar Energy*, v. 72: (2), p. 99-112, 2002.
- DICKINSON, W.C., CHEREMISINOFF, P.N., *Solar Energy Technology Handbook, Part B*, Marcel Dekker, New York, 03-30, 1980.
- DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, II edition, New York, John & Sons, 757 p.,1991.
- FASULO, A, et al. *El uso del policarbonato em dispositivos solares*. XIV Congreso Ibérico y IX Congreso Iberoamericano de Energia Solar, Vigo, Galicia, España, 2008.
- GIL, M. C.; SANTOS, A.C., *Energía solar térmica de baja temperatura*, CENSOLAR (Centro de Estudios de la Energia Solar), PROGNSA, Sevilla, 2001.

HOTTEL, H.C.; WILLIER, A., *Evaluation of flat plate collector performance. In: Transactions of the Conference on the Use of Solar Energy, 2, University of Arizona Press, 174, 1958.*

INCROPERA, F.P., Dewitt, D.P., *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, Guanabara Koogan, 4ª edição, Rio de Janeiro, 2003.

INSTITUTO DO PVC. Disponível em < <http://www.institutodopvc.org>>. Acesso em: 24 mai.,2009.

JAVIER. F.F.R. *Evaluación de La performance de diferentes colectores solares de placa plana usando um simulador solar, construídos com materiales no convencionales*. XIV Congreso Ibérico y IX Congreso Iberoamericano de Energia Solar, Vigo, Galicia , España, 2008.

JÚNIOR, F.S., *Otimização e Desempenho Térmico de um Coletor Solar Alternativo com Tubos Absorvedores de Cobre*, 1995. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

LEITE, P. R. Logística Reversa - Meio Ambiente e Competitividade, São Paulo : Prentice Hall, 2003. 246p.

LOURENÇO, J.M., *Estudo de um Coletor Solar Alternativo, usando Tubos Absorvedores de Alumínio*, 1997. 144f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

MANO, E. B., *Polímeros como materiais de engenharia*, Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 2000.

MATRAWY, K.K.; FARKAS, I., *Comparison study for three types of solar collectors for water heating*, *Energy Convers. Manage.*, 38, 861-869, 1997.

MOLERO.N., et. al. *Nuevo modelo detallado del comportamiento térmico de captadores plano*. XIV Congreso Ibérico y IX Congreso Iberoamericano de Energia Solar, Vigo, Galicia , España, 2008.

NETO, J.H.M., et al. *Análise técnica e econômica de coletores solares de baixo custo e convencionais utilizados para aquecimento de água de banho*, CEBENS – ISES –CLA. II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Latino-Americana da ISES, Florianópolis/SC - 2008.

- POZZEBON, F., KRENZINGER, A. . *Desenvolvimento de um programa de simulação computacional para análise de sistemas térmicos de aquecimento de água*, CEBENS – ISES –CLA. II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Latino-Americana da ISES, Florianópolis/SC - 2008.
- RAGAB, A.R.; ALAWI, H., *Weathering effects on the fracture properties of polyvinyl pipes*, *Journal of Testing and Evaluation*, 9: (1), 44-49, 200.1
- RIVERA, D.A.L., *Projeto de Construção e Análise de Desempenho de um Coletor Solar Alternativo a Baixo Custo*, 1994. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- SHAH, L.J., *Investigation and Modeling of Thermal Conditions in Low Flow SDHW Systems*, Department of Buildings and Energy, Technical University of Denmark, Report R-034, 1999.
- SILVA A. C.G.C, et al. *Modelo de simulação numérica para sistemas de aquecimento de água utilizando energia solar*, CEBENS – ISES –CLA. II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência LatinoAmericana da ISES, Florianópolis/SC - 2008.
- SOUZA, L.G.M., *Alternative solar energy water heating system*, COBEM 2007 – Congresso Internacional de Engenharia Mecânica, Brasília- 2007.
- SOUZA, L.G.M., *Análise comparativa entre coletor solar plano convencional e coletor solar alternativo composto por múltiplos tubos de PVC*, IV CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Belém - PA, 2004.
- SOUZA, L.G.M., BEZERRA, J.M., *Sistema Alternativo de Aquecimento Solar*, CONEM – CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, Natal, 2000.
- SOUZA, L.G.M., *Coletor solar não convencional, de baixo custo, composto por múltiplos tubos absorvedores de PVC*, IV CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Belém - PA, 2004.
- SOUZA, L.G.M., et al. *Sistema de aquecimento solar utilizando elementos recicláveis*, CEBENS – ISES –CLA. II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência LatinoAmericana da ISES, Florianópolis/SC - 2008.
- SOUZA, L.G.M., Gomes, U.U., *Coletor Solar Aletado com Tubos de PVC formando um Novo Modelo de Configuração em Série*, CONEM, João Pessoa/Pb, 2002.
- SOUZA, L.G.M., Gomes, U.U., *Coletor Solar em Labirinto com Tubos Absorvedores de PVC*, CONEM, João Pessoa/Pb,2002.

SOUZA, L.G.M., Gomes, U.U., *Viabilidades térmica, econômica e de materiais da utilização de tubos de PVC como elementos absorvedores em coletores de um sistema de aquecimento de água por energia solar*, Tese de Doutorado do Programa de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais, UFRN, 2002.

SOUZA, L.G.M., *Sistema de aquecimento solar de água para aplicações residenciais utilizando materiais alternativos*, V CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Recife-Pe, 2006.

SULLIVAN, F.R.; ELLEITHY, R.H.; ABU-ALI, A., *Effect of thermal degradation on the impact properties of PVC compounds*, *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 5: (4), 200-204, 1999.

*Trends in Renewable Energies*, SolarAccess.com, Canadian Association for Renewable Energies, 2005-2007.

VAN NIEKERK, W.M.K; Du TOIT, C.G.; SCHEFFLER, T.B., *Performance modeling of a parallel tube polymer absorber*, *Solar Energy*, 58, 39-44, 1996.

VARELLA, F.K.O.M., *Tecnologia solar residencial: inserção de aquecedores solares de água no Distrito de Barão Geraldo – Campinas*, Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, Campinas-São Paulo, 2004.

YACOV, T., ZEMEL, A., *Long-term perspective on the development of solar energy*, *Solar Energy*, 68: (5), 379-392, 2000.

YAO, Q.; WILKIE, C.A., *Thermal degradation of PVC in the presence of polystyrene*, *Journal Vinyl Additives Technological*, 7: (1), 26-30, 2001.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)